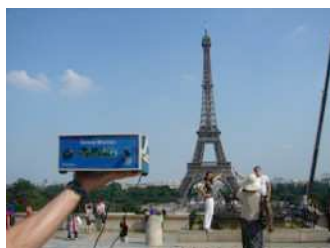


La pollution de l'air en région parisienne : exposition et perception sur les sites touristiques

Sarah DUCHÉ



Thèse co-dirigée par Gérard BELTRANDO et Georges NAJJAR

Thèse de doctorat préparée au sein de l'UMR PRODIG

Membres du Jury :

Gérard BELTRANDO	Professeur à l'université Paris Diderot (directeur)
Pierre CARREGA	Professeur à l'université Nice Sophia Antipolis (rapporteur)
Wilfried ENDLICHER	Professeur à l'université Humboldt de Berlin
Georges NAJJAR	Maître de conférence (HDR) à l'université de Strasbourg (co-directeur)
Isabelle ROUSSEL	Professeure émérite à l'université des Sciences et Technologies de Lille (rapporteur)

La pollution de l'air en région parisienne : exposition et perception sur les sites touristiques

**Atmospheric pollution in Paris area : exposition and perception on
tourist attractions**

Sarah DUCHÉ

Thèse co-dirigée par Gérard BELTRANDO et Georges NAJJAR

Thèse de doctorat préparée au sein de l'UMR PRODIG

Thèse soutenue le 26 juin 2013

Membres du Jury :

Gérard BELTRANDO	Professeur à l'université Paris Diderot (directeur)
Pierre CARREGA	Professeur à l'université Nice Sophia Antipolis (rapporteur)
Wilfried ENDLICHER	Professeur à l'université Humboldt de Berlin
Georges NAJJAR	Maître de conférence (HDR) à l'université de Strasbourg (co-directeur)
Isabelle ROUSSEL	Professeure émérite à l'université des Sciences et Technologies de Lille (rapporteur)

À mes parents,
À ma sœur,

Remerciements

Ce manuscrit est l'aboutissement d'un travail de recherche de plusieurs années dans le cadre d'une allocation de recherche fléchée au sein de l'université Paris Diderot et du laboratoire PRODIG. Au cours de ces années, j'ai eu le plaisir de rencontrer, de discuter, d'interagir et d'être soutenue par de nombreuses personnes que je souhaiterais remercier ici.

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Gérard Beltrando, pour la confiance qu'il m'a accordée au cours de cette thèse, son aide, et tous les financements dont j'ai pu bénéficier grâce à lui. Je remercie mon co-directeur de thèse, Georges Najjar, pour ses relectures et ses conseils.

Je remercie Pierre Carrega, Isabelle Roussel et Wilfried Endlicher de m'avoir fait l'honneur d'être dans mon jury et pour l'intérêt qu'ils portent à ma thèse.

Je souhaite ensuite remercier les personnes qui ont contribué à financer ma recherche doctorale. J'ai bénéficié, pendant les trois premières années de thèse, d'une allocation de recherche fléchée sur le thème « Pollution de l'air et tourisme en Île-de-France » attribuée par le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Nationale. Je remercie vivement toutes les personnes qui m'ont accordé leur confiance et m'ont permise d'être Attachée Temporaire à l'Enseignement et à la Recherche au sein de l'université Paris Diderot pendant les deux dernières années de thèse.

J'ai bénéficié d'un soutien sans faille de Malika Madelin que je remercie infiniment pour son honnêteté scientifique, les discussions qui m'ont permis d'avancer, ses relectures, son aide lors des mesures de terrain (...). J'ai eu aussi beaucoup de plaisir à enseigner à ses côtés et je la remercie pour tout ce qu'elle m'a appris.

Je remercie Nicolas Martin de m'avoir initié aux mesures de terrain à l'ozone le 30 juin et le 1^{er} juillet 2009, et pour le prêt de l'analyseur d'ozone du laboratoire l'UMR Espace 6012. Merci à Philippe Lameloise qui m'a autorisé à utiliser les données de l'association Airparif et avec qui j'aurais malheureusement souhaité échanger plus. Je remercie aussi Aymeric Blanchet et Sandrine Bernier de m'avoir accueillie au sein de l'APPA et de m'avoir conseillé. Je remercie Marcel Langner et Karl Hartmann de m'avoir accordé leur confiance en nous prêtant un camion de mesures des particules (Danke !).

Je suis très reconnaissante à Salem Dahech, sans qui le sujet de cette thèse n'aurait pas vu le jour. Je remercie aussi Joseph Kleinpeter, de l'association ASPA, pour les échanges sur l'image de la pollution de l'air lors de mon mémoire de master 2 à l'université de Strasbourg.

J'ai été intégrée et eu le plaisir de côtoyer les membres du laboratoire PRODIG que je remercie vivement. Merci à Nicolas Delbart et Monique Fort pour leur soutien.

Ce fut un véritable apprentissage et très agréable d'enseigner aux côtés de Sophie Baudet-Michel, François Bétard, Dov Corenblit, Étienne Grésillon, Marianne Guerois, Quentin Hénaff, Émilie Lavie, Pierre Pistre et Josyane Ronchail. Merci. Je remercie aussi Sébastien Depinarde pour sa disponibilité à régler tous les soucis informatiques.

J'ai croisé et fréquenté une diversité de doctorants au cours de ma thèse. Ils m'ont tous apporté ou appris quelque chose à leur manière et je les en remercie : Ariane, Coura, Élodie, Florence,

Louis, Mélanie, Pauline, Sako, Safa, Salman, Wahiba. Un énorme merci à Anne-Laure, Lucile et Romain pour tous les bons moments partagés ensemble, à Maryem pour son sourire et sa bonne humeur, et à Veronica pour les moments piscine. Merci à Chloé, Cyril et Xavier que j'ai eu beaucoup de plaisir à fréquenter lors des colloques.

À tous mes amis, merci :

Aurélien et Elsa, la salle des doctorants fut fort agréable quand nous la partagions ensemble. Merci pour vos relectures, pour tous les échanges, les apéros et tous ceux à venir.

Un immense merci à mes deux camarades pour avoir partagé de nombreuses bières au cours de nos thèses. Docteur Paul, nos découvertes culinaires exotiques au cours de cette thèse furent de véritables délices et j'espère que nous continuerons à les partager ensemble. Un partage différent que celui de l'oreiller ! Mouhahaha ! Docteur Gabriel, l'amitié au carré, surtout quand elle est lvl 1, est tellement kazouk qu'elle en est fleur indigo.

Julie, merci pour ton écoute et nos échanges épistolaires au cours de ces années. 2013 marque un nouveau départ pour toutes les deux. Je souhaite une belle vie à PetitPois et toi.

Merci à Claire et Pere Joan de m'avoir permis de m'évader au cours de ma thèse et pour vos traductions. J'en profite pour remercier toute la famille Meyer que j'ai beaucoup de plaisir à voir.

Un grand merci à Émilie, Laure et Lucile pour votre aide et les soirées passées ensemble. Merci à Fanny, Max et Tania pour tous les bons moments passés ensemble.

Merci à mes bonnes fées chocolat. Miam !

Ma fin de thèse fut marquée par une jolie rencontre avec Dr Grynbug et un soutien sans faille depuis. Merci infiniment pour tout.

Merci à toute ma famille. Merci à Geneviève.

Je ne serais jamais arrivée là sans mes parents et ma sœur. Merci à mes parents pour votre soutien, de m'avoir laissé choisir ma voie en toute liberté, pour toutes les valeurs que vous m'avez transmises, pour les voyages, l'amour des cartes et de la météorologie. Merci à Anne, pour avoir toujours cru que j'étais une sœur super forte et pour tout ce que nous avons partagé toutes les deux.

Laurent, je te remercie pour ces belles années, les voyages, les plaisirs culinaires et ton soutien. Je te souhaite une belle fin de thèse.

J'ai croisé beaucoup de personnes au cours de mes années de thèse avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à échanger et que je remercie ici.

Résumé :

La métropole parisienne concentre un grand nombre d'activités anthropiques et une forte densité de bâtis engendrant de fortes émissions de polluants. L'ozone, le dioxyde d'azote et les particules dépassent fréquemment les seuils critiques annuels et journaliers fixés par l'Union Européenne et la France. L'exposition à des concentrations exceptionnelles de ces polluants peut engendrer des problèmes respiratoires et cardio-vasculaires pour la population et les nombreux touristes en région parisienne. La qualité de l'air peut être une source de nuisance lors du séjour de ces derniers et avoir un impact négatif sur l'image de la région, dont le tourisme est une des premières activités économiques.

Les objectifs de cette thèse sont d'évaluer, d'une part, quand et où les touristes sont le plus exposés à la pollution de l'air, et d'autre part, comment ils la perçoivent.

Pour évaluer l'exposition des touristes, les variabilités spatiale et temporelle de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules ont été étudiées à deux échelles différentes : la première régionale, avec les données issues du réseau de mesures Airparif, et la seconde, plus locale, avec des mesures de concentrations d'ozone et de particules sur différents itinéraires et sites touristiques parisiens. L'exposition est différente selon les polluants, la saison et le lieu. Les touristes sont le plus exposés à l'ozone de mai à septembre lors de journées ensoleillées et dans les espaces verts, loin de la circulation routière. À l'inverse, ils sont le plus exposés aux particules et au dioxyde d'azote d'octobre à avril lors de temps calme avec des inversions thermiques matinales, et à proximité du trafic routier.

La perception des touristes de la pollution de l'air a été évaluée à l'aide d'enquêtes sur les sites de la Tour Eiffel, du Sacré-Cœur et de Notre-Dame sur plusieurs jours. Les touristes estiment globalement une qualité de l'air bonne ou moyenne à Paris. Cette perception varie selon les jours, dépendant essentiellement des conditions météorologiques et de la visibilité du smog, et selon les sites, résultant de nuisances visuelles, olfactives et sonores perçues différemment. L'origine des touristes influe sur leur perception avec une principale différence entre les touristes français et les touristes étrangers.

Mots clés : Île-de-France, Paris, ozone, dioxyde d'azote, particules, variabilité spatiale et temporelle, échelle régionale, échelle locale, perception

Abstract :

The Paris metropolitan area concentrates a lot of human activities and buildings generating high emissions of pollutants. Ozone, nitrogen dioxide and particles often exceed the annual and daily thresholds set by European Union and France. Exposure to exceptional concentrations of these pollutants can cause respiratory and cardiovascular problems for people in Paris. Air quality can be a nuisance and have a negative impact on the image of the area, for which tourism is one of the leading economic activities.

The objectives of this thesis are to evaluate when and where tourists are more exposed to air pollution, and how they perceive it.

To evaluate the exposure of tourists, spatial and temporal variations of ozone, nitrogen dioxide and particulate matter are studied at two different scales : first, at regional scale, with the data from the official monitoring network Airparif, and second, more local, with measurements of ozone and particles on different routes and Parisian sights. Exposure is different depending on pollutants, season and location. Tourists are most exposed to ozone from May to September during sunny days and in green areas, away from traffic. They are more exposed to particles and nitrogen dioxide from October to April during calm weather with morning inversions and nearby road traffic.

Tourists's perception of air pollution was evaluated with questionnaire surveys on the sites of the Eiffel Tower, the Sacré-Cœur and Notre-Dame over several days. Tourists perceive a good or fair air quality in Paris. This perception varies daily depending primarily on weather conditions and visibility of smog. It depends also on sites, resulting from visual, olfactory and noise perceived differently. The origin of tourists affects their perception with one major difference between the French tourists and foreign tourists.

Key words : Ile-de-France, Paris, ozone, nitrogen dioxide, particles, spatial and temporal variation, regional, local, perception

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
 <i>Partie I : Mesures et variabilités de l'exposition et de la perception de la pollution de l'air extérieur</i>	 <i>7</i>
Chapitre I : Les polluants, leur réglementation et leurs facteurs de variabilité	9
Chapitre II : Mesures et évaluation de l'exposition à la pollution de l'air	27
Chapitre III : La perception de la pollution de l'air extérieur	39
 <i>Partie II : Variabilité spatiale et temporelle de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules en région parisienne</i>	 <i>55</i>
Chapitre IV : Réseaux de mesures en région parisienne et approche méthodologique.....	57
Chapitre V : Contexte régional et variabilité spatio-temporelle des taux d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules en région parisienne	69
Chapitre VI : Épisodes de pollution à l'ozone, au dioxyde d'azote et aux particules en région parisienne	93
 <i>Partie III : Variabilité de l'ozone et des particules sur les sites touristiques parisiens</i>	 <i>109</i>
Chapitre VII : Protocole de mesure des taux d'ozone et de particules fines sur les sites touristiques parisiens	111
Chapitre VIII : Exposition des touristes à l'ozone lors d'un épisode de pollution sur des sites touristiques parisiens	121
Chapitre IX : Variabilité spatiale des particules selon différents itinéraires et modes de transports touristiques à Paris	129
 <i>Partie IV : Perception de la pollution de l'air par les touristes à Paris</i>	 <i>141</i>
Chapitre X : Questionnaires, lieux et jours des enquêtes	143
Chapitre XI : Entre exposition et perception de la pollution atmosphérique par les touristes	161
Chapitre XII : Représentation de la qualité de l'air par les touristes à Paris	179

Conclusion générale et perspectives.....	195
Bibliographie.....	203
Table des figures	215
Table des tableaux.....	221
Table des matières.....	223
Annexes	225

Introduction générale

Avec 11,6 millions d'habitants, la métropole parisienne concentre un grand nombre d'activités anthropiques (trafic routier, industries, secteur tertiaire) et une forte densité de bâtis engendrant de fortes émissions de polluants. Son climat océanique dégradé et son site avec un faible relief sont plutôt favorables à la dispersion de la pollution atmosphérique (Alary *et al.*, 1995 ; Menut *et al.*, 2000 ; Gros *et al.*, 2007). Cependant, l'ozone, le dioxyde d'azote et les particules dépassent fréquemment les seuils critiques annuels et journaliers fixés par l'Union Européenne et la France pour limiter les risques sanitaires (Airparif, 2013). L'exposition à des concentrations exceptionnelles de ces polluants durant quelques jours ou quelques semaines engendre des problèmes respiratoires, cardio-vasculaires et cardiaques (Le Tertre *et al.*, 2002 ; Stieb *et al.*, 2002 ; Bell *et al.*, 2004 ; Samoli *et al.*, 2006). Une exposition régulière à la pollution atmosphérique augmente les risques de maladies chroniques respiratoires ou cardio-vasculaires, et de cancers (Dockery *et al.*, 1993 ; Pope *et al.*, 1995 ; Brücker *et al.*, 2006).

L'exposition à la pollution de l'air est caractérisée par la concentration de polluants à laquelle une personne est soumise durant un laps de temps (Ambroise *et al.*, 2005). Cette exposition dépend des variabilités spatiale et temporelle de la pollution de l'air à différentes échelles. Trois échelles spatiales sont définies pour l'étude de la pollution de l'air : locale, régionale et globale (fig. A). L'échelle locale correspond à la pollution de proximité, celle à laquelle les individus sont exposés à proximité directe des sources d'émission (véhicules, industries, chantiers, *etc.*). La pollution émise est ensuite dispersée ou accumulée, transportée jusqu'à des centaines de kilomètres et/ou transformée en polluants secondaires. Cette pollution de fond se mesure à l'échelle régionale, et dépend beaucoup des conditions météorologiques. Ces deux échelles sont étroitement liées : les niveaux de polluants mesurés à l'échelle régionale dépendent des sources d'émission de l'échelle locale, et les niveaux de polluants mesurés à une échelle locale sont d'autant plus forts que la pollution de fond est élevée. L'échelle globale ou planétaire ne concerne pas directement l'exposition des individus. La couche d'ozone et le réchauffement climatique sont traités à cette échelle. Les variabilités spatiale et

temporelle des taux d’ozone, de dioxyde d’azote et de particules sont étudiées aux échelles régionale et locale dans cette thèse.

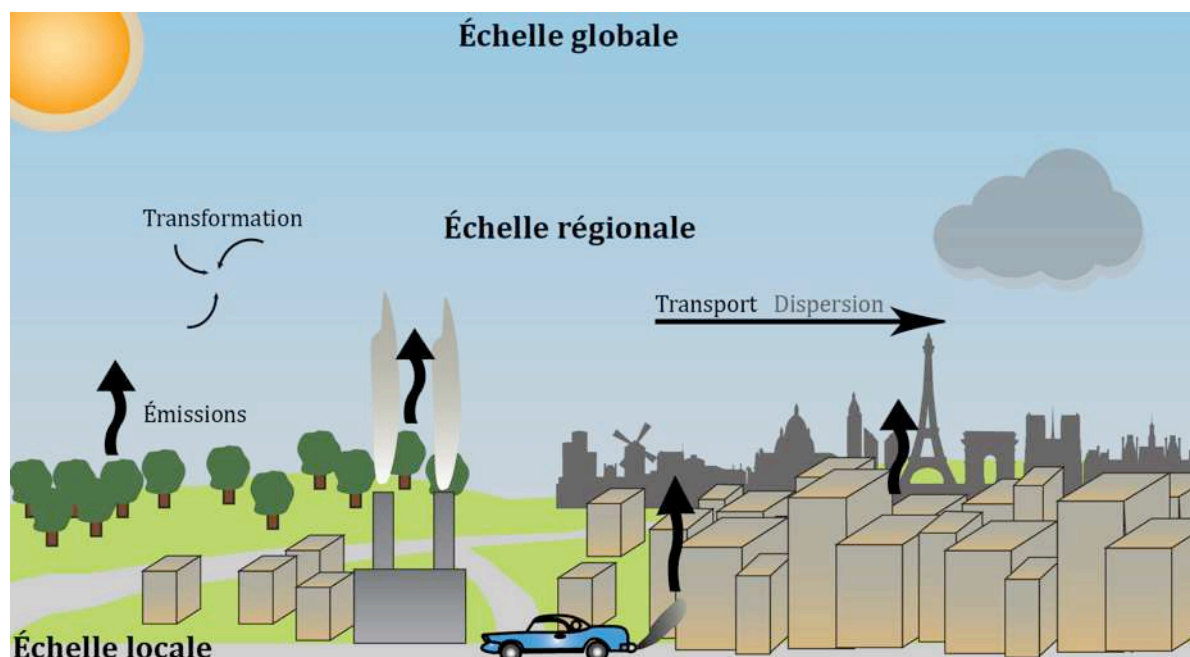


Figure A : Les échelles spatiales de la pollution de l’air, *adaptée d’après www.atmo-alsace.net*

L’association de surveillance de la qualité de l’air en région parisienne Airparif estime que trois millions de franciliens sont potentiellement exposés à des niveaux de pollution de l’air dépassant les seuils critiques, principalement à côté du trafic routier (Airparif, 2013). Les nombreux touristes à Paris (28,9 millions y ont séjourné en 2011) passent beaucoup de temps à l’extérieur et dans les transports (Observatoire économique du tourisme parisien, 2012). Ils sont donc potentiellement exposés à la pollution de l’air parisien lors de leur séjour en région parisienne. Ils restent en moyenne moins de trois nuitées durant leur séjour, ils sont donc affectés par la pollution atmosphérique à court terme, et particulièrement lors d’épisodes de pollution. L’augmentation des niveaux de polluants (principalement ozone, particules et dioxyde d’azote) et les épisodes ponctuels de pollution peuvent donc entraîner des problèmes respiratoires ou cardio-vasculaires pour les touristes les plus sensibles. La pollution atmosphérique peut être ressentie comme une nuisance liée à des perceptions visuelle (pots d’échappement, poussières, opacité de l’air), olfactive et cénesthésique (picotements des yeux, difficultés respiratoires ; Moser, 2007). Elle peut engendrer du stress, indépendamment de l’exposition réelle à cette pollution et avoir indirectement des impacts sanitaires (Annessi-Maesano, 2007 ; Roussel, 2007).

Même si la plupart des touristes ne viennent pas à Paris pour sa qualité environnementale, «*l'espace urbain est d'autant plus apprécié s'il offre un environnement agréable aux touristes*» (Pottier et Terrier, 2007) ; d'autant plus que les problèmes environnementaux sont de plus en plus médiatisés et au cœur des préoccupations actuelles (IRSN, 2011). L'image de la métropole touristique parisienne peut être dégradée par la perception de la qualité de l'air qu'ont les touristes ou par les photographies prises lors de leur séjour (fig. B). Avec une part de 10% du PIB régional et un tiers des emplois touristiques français, le tourisme est un véritable enjeu pour la métropole parisienne (Observatoire économique du tourisme parisien, 2010). Elle est l'une des villes les plus touristiques au monde, mais, face à l'émergence du tourisme dans d'autres villes européennes (Berlin, Munich, Vienne, *etc.*) et internationales (Pékin, Hong Kong, Singapour, *etc.*), elle doit garder une image positive pour attirer les touristes. Nous chercherons à évaluer si les touristes sont gênés par la pollution de l'air francilienne, et si leur perception peut avoir des répercussions sur l'activité touristique.



Figure B : Photographie prise sur le parvis du Sacré-Cœur le 25 juillet 2012 à 15h lors d'un épisode de pollution à l'ozone (taux horaire d'ozone mesuré à la station Paris 18^{ème} de Airparif à 15h = 163 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Enfin, le choix des touristes comme sujet d'étude de la perception de la pollution de l'air est d'autant plus intéressant que leurs origines, leur culture et leur accès aux questions environnementales sont différents. La perception de la pollution atmosphérique est variable d'un individu à l'autre. De même, la vulnérabilité éprouvée par chacun face à

celle-ci est variable selon les individus. Elle dépend des perceptions sensorielles et cognitives de chacun. Celles-ci résultent d'une construction personnelle, influencée par de multiples facteurs parmi lesquels on peut retrouver ses connaissances et l'accessibilité à l'information sur le sujet, son histoire personnelle ou sa vision des enjeux (Harpet, 2010).

Dans le contexte d'une métropole touristique pour laquelle la pollution atmosphérique est problématique, les objectifs de la thèse sont d'**évaluer**, d'une part, **quand et où les touristes sont le plus exposés à la pollution de l'air**, et d'autre part, **comment ils la perçoivent**. Nous allons ainsi chercher à répondre aux questions suivantes :

- ➔ Où et quand les concentrations d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules sont-elles les plus élevées ? À proximité de quelles sources d'émission ? Durant quelles conditions météorologiques et d'émission ?
- ➔ Comment les touristes perçoivent-ils la pollution de l'air extérieur ? Est-ce que leur représentation est différente de la réalité et si oui, quels sont les facteurs qui peuvent l'expliquer ? Est-ce que leurs différentes origines et cultures influent sur leur perception ?
- ➔ Leur représentation de la qualité de l'air à Paris peut-elle être un frein au retour de certains touristes en région parisienne ?

Pour répondre à ces interrogations, nous avons choisi dans un premier temps d'étudier les variabilités spatiale et temporelle de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules en Île-de-France à deux échelles différentes : la première régionale, avec les données issues du réseau de mesures Airparif, et la seconde, plus locale, avec des mesures de concentrations d'ozone et de particules sur différents itinéraires et sites touristiques parisiens. Dans un second temps, nous avons interrogé les touristes sur les sites de la Tour Eiffel, du Sacré-Cœur et de Notre-Dame pour avoir une idée de leur perception de la qualité de l'air.

Cette thèse est composée de quatre parties :

- **La première partie dresse l'état de l'art et le cadre scientifique de l'étude.** Le premier chapitre traite les principaux polluants en Île-de-France (ozone, dioxyde d'azote et particules), leurs effets sanitaires, leurs normes et leurs facteurs de variabilités spatiale et temporelle. Le second chapitre montre les différents types de

mesures et d'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air. Le troisième chapitre expose les facteurs sensoriels et cognitifs de variabilité de la perception. Cette partie permet d'expliquer les choix méthodologiques qui ont été faits dans la thèse.

- **La seconde partie étudie les variabilités de la pollution de l'air à l'échelle régionale.** Un premier chapitre (chapitre IV) expose les données issues du réseau de mesures automatiques de l'association Airparif, les données météorologiques utilisées et les méthodes statistiques utilisées pour étudier les variabilités. Un second chapitre (chapitre V) résume le contexte régional de la pollution de l'air en étudiant les variations temporelles annuelles, saisonnières, horaires et hebdomadaires, et la variabilité spatiale des polluants à l'échelle régionale de 2000 à 2012. Un dernier chapitre (chapitre VI) décrit différents épisodes de pollution estivaux, hivernaux et printaniers qui ont eu lieu entre 2007 et 2012.

- **La troisième partie présente les résultats des mesures réalisées selon plusieurs modes de transport et itinéraires touristiques.** Le premier chapitre (chapitre VII) décrit les capteurs d'ozone et de particules utilisés, les jours des mesures, les itinéraires et les modes de transport empruntés. Les résultats des mesures des taux d'ozone réalisées le 30 juin et le 1^{er} juillet 2009 à pied et à vélo sont analysés dans un second temps (chapitre VIII). Enfin, la variabilité spatiale à une échelle fine et ses origines sont étudiées dans le chapitre IX à l'aide des résultats des mesures de taux de particules réalisées à pied, à vélo, en bus touristique et en péniche sur plusieurs jours.

- **La quatrième partie analyse les enquêtes de terrain réalisées auprès des touristes.** Un premier chapitre (chapitre X) présente la méthodologie d'enquête employée, les jours et les sites des enquêtes. Des différences entre l'exposition réelle à la pollution atmosphérique des touristes et leur perception sont mises en évidence et expliquées (chapitre XI). Le dernier chapitre (chapitre XII) traite des différences de perception de la qualité de l'air selon les origines géographiques et culturelles des touristes.

Partie I

Mesures et variabilités de l’exposition et de la perception de la pollution de l’air extérieur



A l’aide d’une synthèse bibliographique, cette première partie pose les jalons thématiques du contexte de la problématique de cette thèse.

Dans un premier chapitre, les polluants mesurés à l’extérieur et étudiés dans cette thèse (ozone, dioxyde d’azote, particules) sont présentés à travers leurs sources d’émission, leur formation, leurs impacts sanitaires, leurs normes et leurs facteurs de variabilité spatiale et temporelle.

Le second chapitre expose les différentes mesures objectives et les évaluations de la pollution de l’air extérieur à l’échelle régionale et locale.

Enfin, les facteurs influençant la perception de la pollution de l’air ainsi que les méthodes de mesure de cette perception sont montrés dans le troisième chapitre.



Chapitre I

Les polluants, leur réglementation et leurs facteurs de variabilité

L'ozone, le dioxyde d'azote et les particules sont actuellement des polluants problématiques à l'extérieur en région parisienne car ils présentent un risque sanitaire avec des concentrations moyennes annuelles, journalières et horaires relativement élevées et parfois supérieures aux normes réglementées et préconisées selon la proximité des sources d'émission et les conditions météorologiques (Airparif, 2012a).

Dans un premier temps, ce chapitre définit ces polluants, leurs sources d'émission et leur mode de formation. Dans un second temps, les normes annuelles et journalières de ces polluants sont exposées. Enfin, leurs facteurs de variabilité spatiale et temporelle sont présentés.

I.1. Définition, sources et formation des polluants problématiques

Les polluants peuvent être classifiés en deux catégories : les polluants primaires et les polluants secondaires. Les polluants primaires, tels que les oxydes d'azote (NO_x) et les particules d'origine primaire, sont directement émis par des sources d'émission (trafic routier, les industries, les bâtiments, *etc.*). Les polluants secondaires, l'ozone (O_3) et les particules secondaires, se forment par photochimie ou par réaction chimique à partir des polluants primaires.

La nature et la quantité des polluants primaires émis par diverses sources d'émission sont répertoriées dans des inventaires d'émission. Lorsque les émissions sont spatialisées, l'inventaire est alors désigné comme un cadastre des émissions. L'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) a publié en 1979 un manuel de *Gestion de la qualité de l'air* dans lequel la méthode des recensements conseillée est expliquée (OMS, 2001). Ils sont réalisés à partir d'enquêtes et d'informations détaillées sur les sources d'émissions fixes ou mobiles (industrie, chauffage, véhicules, *etc.*) sur une zone géographique bien définie (Rossano et Rolander, 1976). En France, le premier inventaire des émissions a été établi sur l'année 1994 par le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique) en prenant en compte les

oxydes d’azote NO_x , les composés organiques volatiles COV, le dioxyde de soufre SO_2 et le monoxyde de carbone CO (CITEPA, 1994). Le CITEPA réalise tous les ans un inventaire à l’échelle nationale. Depuis la loi sur l’air et l’utilisation rationnelle de l’énergie (Laure) en 1996, chaque région doit établir tous les cinq ans un plan régional pour la qualité de l’air (PRQA) régi par le code de l’environnement (articles L222-1 à L222-3 et R222-1 à R222-12). Dans le cadre de ce plan, les émissions des polluants atmosphériques doivent être obligatoirement répertoriées au niveau régional (Conseil régional d’Île-de-France, 2009). L’inventaire le plus récent en région parisienne a été établi par le conseil régional de l’Île-de-France avec l’aide d’Airparif (l’association de la surveillance de la qualité de l’air en Île-de-France) avec comme année de référence, 2005 et révisé en 2008 (Airparif, 2009a). Cet inventaire recense, sur une période bien définie, l’ensemble des émissions des polluants atmosphériques faisant l’objet d’une surveillance permanente tels que les polluants primaires (oxydes d’azote NO_x , le monoxyde de carbone CO, le dioxyde de soufre SO_2 , les composés organiques volatiles non méthaniques COVNM et les particules fines PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$) et les principaux gaz à effet de serre (dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 et le protoxyde d’azote N_2O). Ce recensement se fait à plusieurs échelles temporelles (annuelles, mensuelles, hebdomadaires, journalières et horaires) et à des échelles spatiales différentes :

- à une échelle plus large (nationale, régionale et départementale) avec des données de population, zones bâties, zones cultivées (...);
- à une échelle plus locale (commune, axe routier) avec, par exemple, les types d’établissements par commune, le comptage routier (...).

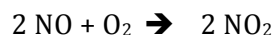
Les émissions pour chaque activité polluante recensée sont un produit entre la quantité d’activité selon le type d’activité par laps de temps (par exemple, flux et vitesse du trafic routier) et le facteur d’émission pour chaque polluant et activités (dépendant du type de moteur, de la vitesse du véhicule, etc.; Werner, 2009).

Le cadastre des émissions permet de connaître la part de chaque activité dans les émissions des polluants et entre autres, de ceux que nous étudions, dioxyde d’azote et particules. Il est disponible pour chaque polluant atmosphérique à plusieurs échelles (régionale, départementale et communale) sur le site d’Airparif (www.airparif.asso.fr).

Après avoir défini chaque polluant, nous présenterons les principales sources d’émission des polluants primaires en Île-de-France et le mode de formation des polluants secondaires.

I.1.1.1. Le dioxyde d'azote NO₂

Le dioxyde d'azote (NO₂) est fréquemment associé au monoxyde d'azote (NO). Ils ont longtemps été mesurés ensemble par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air car la mesure séparée était difficile (Fontan, 2004). La somme de ces deux polluants est désignée par les oxydes d'azote (NO_x). Ils sont principalement émis sous la forme du monoxyde d'azote NO par les combustions fossiles à haute température (moteur thermique des transports, production d'énergie thermique et d'électricité, *etc.*). Dans l'atmosphère, au contact de l'oxygène, le NO s'oxyde en NO₂ :



La figure I.1 présente les principales sources d'émission francilienne des oxydes d'azote en 2005 et révisé en 2008 à partir du cadastre des émissions réalisées par Airparif. Le trafic routier est le principal émetteur de NO_x en Île-de-France (les moteurs diesel en rejettent deux fois plus que les moteurs à essence catalysés). Les véhicules particuliers représentent 41% des émissions, suivis des poids lourds (31%) et des bus (9%). Un cinquième des émissions de NO_x sont émises par le secteur résidentiel et tertiaire. Le gaz naturel utilisé pour le chauffage résidentiel est à l'origine de la majeure partie des émissions de NO_x dans ce secteur (Airparif, 2009a). Les autres secteurs ont des parts plus faibles dans les émissions des NO_x (entre 1 et 7%). Ces pourcentages d'émission vont varier à une échelle plus fine (départementale ou communale) selon la présence et la proximité des sources d'émission. Pour l'inventaire des émissions révisées en 2011 sur la base de l'année 2008, environ 95% des émissions de NO_x sont dues au trafic routier et au secteur résidentiel et tertiaire car les autres secteurs sont peu ou pas présents dans la capitale (Airparif, 2012b).

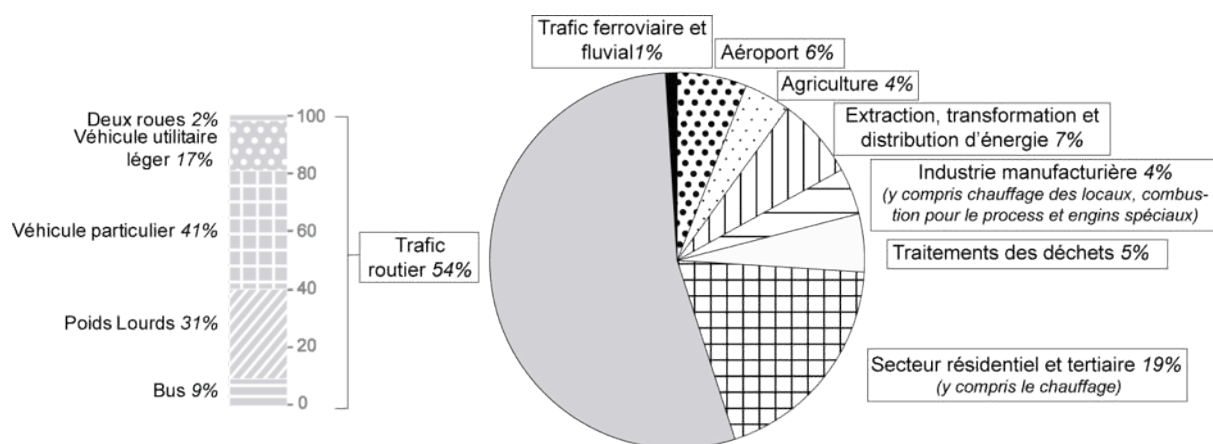


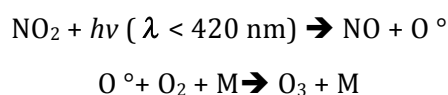
Figure I.1 : Pourcentage des sources d'émission de NO_x en Île-de-France pour l'année 2005 et révisé en 2008 ; source : Airparif, 2009a

Bien que les NO_x soient souvent étudiés ensemble, seul le NO₂ est nocif pour la santé et donc considéré comme un des principaux polluants problématiques.

I.1.2. L'ozone O₃

L'ozone troposphérique est un polluant secondaire, principal polluant photochimique (Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France, 1996 ; Kleinman *et al.*, 1997 ; Sillman, 1999 ; Kleinman, 2005 ; Camredon et Aumont, 2007). Aux échelles locales, régionales et globales, l'ozone se forme par oxydation photochimique à partir des oxydes d'azote NO_x, des composés organiques volatiles COV et des radicaux HO_x. Dans une moindre mesure, le monoxyde de carbone CO et le méthane CH₄ peuvent aussi être à la source de l'O₃. La formation principale de l'ozone se fait toujours en présence de NO_x mais une complexité de réactions chimiques peut intervenir dans la formation de l'ozone (Camredon et Aumont, 2007). Nous présenterons ici les deux principales : avec le COV et le NO_x.

L'O₃ est naturellement en équilibre avec les NO_x. Le NO₂ est dissocié sous l'effet du rayonnement solaire $h\nu$ (en dessous de 420 nm de longueur d'onde) qui donne du monoxyde d'azote NO et du oxygène O. Ce dernier réagit avec le dioxygène O₂ pour former de l'ozone O₃. La réaction nécessite une molécule non réactive M, pour prendre l'énergie libérée et stabiliser l'O₃.



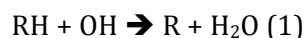
L'ozone O₃ réagit avec le monoxyde d'azote NO, formé lors de la dissociation du dioxyde d'azote NO₂, pour redonner du dioxyde d'azote :



C'est ce qu'on appelle la *titration* de l'ozone par le monoxyde d'azote NO. La *titration* est un terme anglais qui désigne le titrage en français mais n'a pas de réel équivalent lorsque l'on parle de la destruction de l'ozone par le monoxyde d'azote. Dans les sites urbains, près du trafic routier qui émet principalement du NO₂ sous forme de NO, la destruction de l'O₃ est donc plus importante que sa formation à partir du NO₂ (Fontan, 2004 ; Itano *et al.*, 2007).

A cause de cette relation entre l'O₃ et les NO_x, les fortes concentrations d'O₃ qui peuvent être observées ne sont pas uniquement dues aux émissions de NO_x. Les composés organiques volatiles non méthaniques COV jouent un rôle essentiel dans la formation de l'O₃ en permettant la formation du dioxyde d'azote NO₂ à partir de l'oxyde d'azote NO. Les COV, regroupant les hydrocarbures (alcane, alcène, alcyne aromatiques) et les composés oxygénés (aldéhydes et cétones), sont essentiellement émis par combustion, par l'évaporation des solvants lors de leur fabrication, de leur stockage ou de leur utilisation, mais aussi de façon naturelle par la végétation (isoprène et terpènes ; Airparif, 2009a). Environ 40% des émissions des COV proviennent des industries manufacturières en Île-de-France, 30 % d'origine tertiaire et résidentielle et 20% de sources automobiles.

Les composés organiques volatiles RH réagissent avec le radical OH pour former un radical peroxy RO_2 (1) (2) qui va réagir avec le monoxyde d'azote NO pour donner du dioxyde d'azote NO_2 (3) :



Le monoxyde d'azote NO n'est alors plus disponible pour détruire l'ozone O_3 . L'ozone troposphérique O_3 résulte donc de réactions chimiques complexes principalement à partir des oxydes d'azote, des composés organiques volatils et du radical OH.

I.1.3. Les particules PM10 et PM2,5

De nombreux travaux scientifiques ont été réalisés depuis une dizaine d'années sur les particules, traduisant leur complexité et entraînant une évolution des connaissances, des méthodes de mesure et des normes réglementaires (Fontan *et al.*, 2005 ; Primequal-Predit, 2005 ; MEDAD, 2007 ; Airparif, 2008c ; Affset, 2009). Le terme « particule » désigne un mélange solide et/ou liquide présent dans un mélange gazeux. On parle aussi d'aérosols indiquant à la fois les particules et le gaz dans lequel elles se trouvent en suspension. La pollution particulaire est beaucoup plus complexe que les polluants gazeux tels que le NO_2 et l' O_3 car elle ne présente pas une entité chimique bien définie mais un mélange hétérogène dont chaque élément est caractérisé par un état (solide et/ou liquide), une granulométrie, une composition chimique, une dynamique d'évolution dans l'atmosphère et une diversité de sources d'émission aussi bien naturelle que anthropique (Guégan *et al.*, 2008).

Pendant longtemps, les particules étaient mesurées sous la forme de fumées noires (*Black Smoke*) qui désignent par convention des particules noirâtres, présentant des dimensions suffisamment petites pour demeurer en suspension dans l'air. Ce sont essentiellement des particules carbonées issues de la combustion qui sont recueillies sur un filtre et sont évaluées par réflectométrie (Airparif, 2008c). Actuellement, depuis la directive européenne n°1999/30/CE du 22 avril 1999 transposée dans le droit français par le décret du 15 février 2002, les particules se mesurent par la concentration en masse des PM10 et PM2,5 (Affset, 2009). PM désignant « *particulate matter* » en anglais, les PM10 et les PM2,5 sont des particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à 10 μm et 2,5 μm . Les particules ayant un diamètre entre 2,5 et 10 μm sont dites « grossières » et celles avec un diamètre inférieur à 2,5 μm sont dites « fines ». La mesure de la taille des particules n'est probablement pas l'indicateur le plus pertinent pour mesurer les particules car elle ne prend pas en compte leur composition chimique (Harrison et Yin, 2000).

Les particules « primaires »

Les particules présentes dans l'air ambiant peuvent être à la fois « primaires » et « secondaires » (Airparif, 2008c ; Guégan *et al.*, 2008). Les particules primaires sont directement émises dans l'atmosphère par des sources naturelles (d'origine terrigène, marine ou biogénique) et par des sources anthropiques (transport routier, industrie manufacturière, résidentiel-tertiaire, agriculture, transformation d'énergie ; CITEPA - SECTEN, 2011). La figure I.2 montre la répartition par secteur des sources d'émission des PM10 et PM2,5 en Île-de-France en 2005 et révisée en 2008. Pour les deux polluants, la contribution des phénomènes de remise en suspension et de transformation chimique n'est pas prise en compte. On s'intéresse ici uniquement aux particules primaires (Airparif, 2009a). 28% des PM10 et 23% des PM2,5 sont émis par le trafic routier, proportions moins importantes que pour les NO_x. Les véhicules particuliers contribuent à 10% des émissions franciliennes de PM10. Les véhicules utilitaires légers représentent 7% des émissions, tout comme l'usure des routes, des pneus, des plaquettes freins entraînant un phénomène d'abrasion des pneus, de la route et/ou des freins qui est responsable de 7% des PM10. Dans l'inventaire de 2005 et révisé en 2008, le phénomène d'abrasion n'est pas pris en compte dans les sources d'émission des PM2,5. Cependant plusieurs études internationales montrent que l'abrasion des pneus est une source importante d'émission des particules fines (Wahlinet *al.*, 2006 ; Quérol *et al.*, 2007 ; Almato *et al.*, 2010). Ces dernières années les études sur les particules fines et ultrafines se sont multipliées. Leurs sources d'émission étaient moins bien définies. L'association Airparif a publié un rapport en 2011 sur l'origine des particules dans lequel les sources d'émission des PM2,5, et entre autres celles du trafic routier, sont mieux connues (Airparif, 2011b).

Le secteur résidentiel et tertiaire est le second secteur le plus important d'émission de PM10 et PM2,5, la combustion du bois en étant le contributeur majoritaire. Cette proportion du secteur résidentiel comme une des principales sources d'émission des PM10, diminue légèrement dans Paris (Airparif, 2012b) ; car, d'après l'arrêté du 22 janvier 1997, créant une zone de protection spéciale contre les pollutions atmosphériques en Ile de France, les feux de cheminée sont très réglementés à Paris. Il existe encore quelques incertitudes sur les facteurs d'émissions de particules dans le secteur résidentiel, dues à l'absence de données précises sur les équipements et plus particulièrement le chauffage (chaudière au bois, cheminée,... ; Collet, 2009). Un quart des émissions s'explique aussi par le secteur industriel et plus particulièrement, les travaux en bâtiment, les carrières, les aciéries et la production d'engrais.

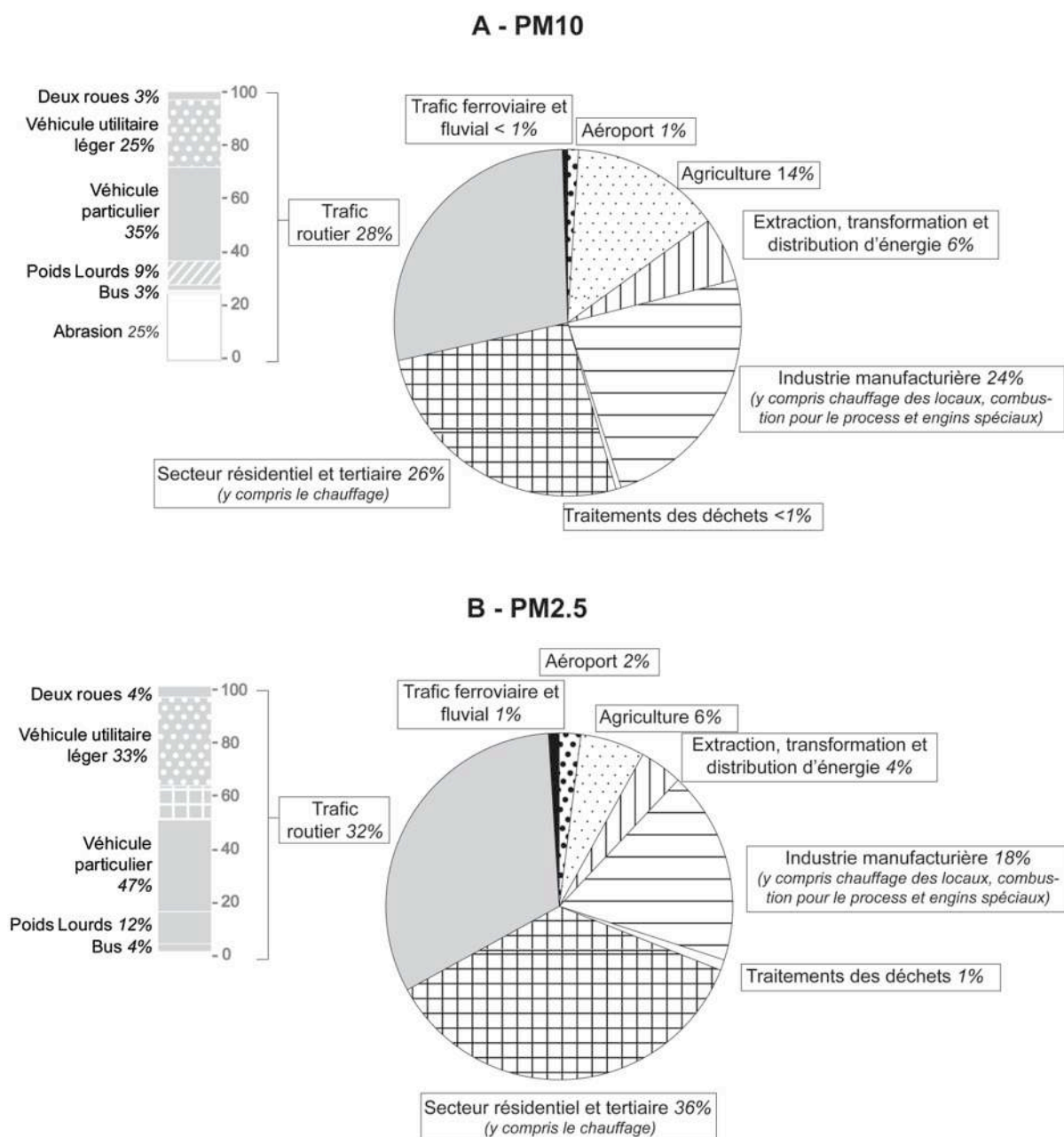


Figure I.2 : Pourcentage des sources d'émission de PM10 (A) et PM2,5 (B) en Île-de-France pour l'année 2005 et révisé en 2008 ; source : Airparif, 2009a

Les particules « secondaires »

Les particules dites « secondaires » sont des particules formées dans l'atmosphère par des processus chimiques complexes, à partir notamment de précurseurs tels que les oxydes de soufre, d'azote, l'ammoniac et les composés organiques volatiles. La composition chimique des particules est donc très variable. Leurs principaux composés sont (Putaud *et al.*, 2004, Ebner, 2005, Pernelet-Joly, 2008) :

- des composés carbonés : les particules carbonées sont constituées d'une composante organique (OC) d'origine primaire et secondaire, et d'une composante « black carbon » (BC)

également appelée carbone-élémentaire ou carbone-suie, d’origine primaire essentiellement.

- des composés minéraux et sel (chlorure de sodium, carbonate de sodium...) issus de l’érosion et de la remise en suspension (érosions des routes et des sols, travaux de chantiers...);
- des composés inorganiques (sulfates et nitrates) d’origine secondaire essentiellement formés à partir d’ammoniac et de forme acide (sulfurique et nitrique) à partir des oxydations d’azote et de soufre ;
- des métaux provenant d’émissions industrielles, de phénomènes abrasifs et de la combustion ;
- des composés d’origine biogène comme par exemple le pollen, les spores et divers micro-organismes (champignon, spores...) qui sont allergènes.

La composition chimique des particules va varier au niveau spatial et temporel mais aussi selon la taille des particules. Cet aspect rend la caractérisation des particules très complexe et leurs effets sur la santé vont différer selon leur granulométrie mais aussi selon leur composition chimique (Marano, 2007 ; Festy, 2008 ; Pernelet-Joly, 2008). Un numéro spécial sur les particules a été publié en novembre 2012 dans la revue *Pollution Atmosphérique* faisant un bilan des connaissances sur les particules.

I.2. Effets sur la santé et réglementations de la pollution de l’air

L’O₃, le NO₂, les PM₁₀ et PM_{2,5} sont des polluants actuellement problématiques en région parisienne car ils dépassent fréquemment les seuils annuels et journaliers ou horaires fixés par l’OMS, l’Union Européenne et la France. Ces dépassements peuvent entraîner un risque sanitaire pour la population.

I.2.1. Effets sanitaires de la pollution de l’air

La pollution atmosphérique présente des risques sanitaires pour les individus à court et à long terme. Les effets à court terme sont les manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques qui apparaissent après l’exposition à la pollution atmosphérique dans des délais brefs (de quelques jours à quelques semaines). Les liens à court terme entre la pollution atmosphérique urbaine et la mortalité et la morbidité sont bien établis et quantifiés depuis plusieurs années. De nombreux programmes de recherche souvent multicentriques et des études épidémiologiques, toxicologiques, biologiques et expérimentales ont été mis en place depuis les années 90 : par exemple, les programmes européens Psas-9 (Programme de surveillance air et santé 9 villes ; PSAS, 2008) et APHEA (Air Pollution and Health-European Approach ; Katsouyanni *et al.*, 1996 ;

Katsouyanni *et al.*, 1997 ; Touloumi *et al.*, 1997), le programme américain NMMAPS (National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study ; Samet *et al.*, 2000) ou encore, les programmes de l'Observatoire régional de la santé d'Île-de-France Erpurs (Evaluation de la pollution urbaine sur la santé ; Medina *et al.*, 1994 ; Host *et al.*, 2008). Les études épidémiologiques ont mis en évidence une relation positive entre la mortalité et les principaux polluants atmosphériques (dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, monoxyde de carbone, ozone et particules), particulièrement pour des causes respiratoires, cardio-vasculaires et cardiaques (Le Tertre *et al.*, 2002 ; Stieb *et al.*, 2002 ; Bell *et al.*, 2004 ; Samoli *et al.*, 2006). De nombreuses études se sont également intéressées aux effets de la pollution de l'air sur la morbidité en mettant en relation les niveaux de polluants et les admissions hospitalières et consultations médicales pour des pathologies cardio-vasculaires. Des liens significatifs ont été mis en évidence mais variables selon le polluant et les pathologies plus spécifiques telles que l'asthme, la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), l'insuffisance cardiaque, les cardiopathies ischémiques, l'infarctus du myocarde ou les maladies cérébrovasculaires (Anderson *et al.*, 1997 ; Atkinson *et al.*, 2001 ; Host *et al.*, 2008).

Actuellement, moins de travaux de recherche ont été réalisés sur les effets à long terme de la pollution de l'air, c'est-à-dire les effets sanitaires qui se produisent à la suite d'une exposition chronique. Il est compliqué et coûteux de mesurer les effets cumulatifs de l'exposition à la pollution atmosphérique tout au long de la vie (Kuenzli, 2006). Les premières études ont été menées par des américains à travers l'étude des « six villes » et l'étude de l'« American cancer Society » (Dockery *et al.*, 1993 ; Pope *et al.*, 1995). Ces travaux et les autres qui ont suivi vont tous dans le même sens et mettent en évidence des effets chroniques (respiratoires, cardio-vasculaires, cancers) lors de l'exposition fréquente à la pollution de l'air urbaine (*cf. Extrapol* n°29 et n°30). L'association de forts niveaux de pollution à court terme et de l'exposition à long terme d'un individu peut mener à un risque sanitaire aigu ou déclencher une maladie chronique dans certains cas (Eilstein, 2006 ; InVS, 2008).

Les personnes âgées, les enfants et les personnes souffrant de maladies chroniques respiratoires ou cardio-vasculaires sont les plus touchés par les effets de la pollution de l'air (Brauer *et al.*, 2002 ; *Extrapol* n°25 et 26).

I.2.2. Les réglementations de la pollution de l'air

Afin d'évaluer l'exposition de la population à la pollution de l'air, de la limiter et d'informer, des normes françaises et européennes et des recommandations de l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) existent.

Les valeurs limites fixées par l'OMS sont plus sévères que celles fixées par l'Union Européenne et la France. Ce sont des lignes directrices pour conseiller les mesures de réduction de la pollution

de l'air (OMS, 2005). Comme pour les réglementations européennes et françaises, elles sont fixées à partir des résultats des études épidémiologiques et toxicologiques à court et à long terme. Elles sont réactualisées à partir des nouveaux résultats (OMS, 1987 ; OMS, 2000 ; OMS, 2005). Les études de toxicologie sur le NO₂ montrent qu'il existe un seuil au-dessus duquel les bronches peuvent être affectées par ce polluant à court terme (200 µg/m³ pour une heure ; Brunekreef et Holgate, 2002). Aucun seuil n'a été mis en évidence pour les taux de PM₁₀, PM_{2,5} et d'O₃. Les risques sanitaires augmentent lors d'un accroissement des concentrations de ces polluants (Bell, 2006 ; Affset, 2009). Les limites fixées par l'OMS sont à titre indicatif et ne permettent pas une diminution totale des risques sanitaires.

La réglementation française suit globalement les directives européennes n°2008/50/CE du 14 avril 2008 et n°2004/107/CE du 15 décembre 2004. Les indices français de qualité de l'air sont définis dans le Code de l'environnement (articles R221-1 à R221-3 ; tab. I.1). Ils évoluent selon les réglementations européennes. Par exemple, fin 2011, le seuil d'information et de réglementation pour les PM₁₀, premier seuil à court terme, est passé de 80 µg/m³ à 50 µg/m³ en moyenne horaire, et le seuil d'alerte, second seuil à court terme, est passé à 125 µg/m³. A court terme, les seuils réglementés sont des taux moyens horaires et journaliers au-delà desquels une procédure d'information ou une intervention d'urgence sont déclenchées (seuil de recommandation et d'information, et seuil d'alerte) car une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles ou de toute la population. Deux seuils différents existent :

- *Seuil de recommandation et d'information* : niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend nécessaire l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions.
- *Seuil d'alerte* : niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant des mesures d'urgence.

Les normes sur le long terme sont des niveaux annuels à atteindre ou un nombre maximum de niveaux journaliers à ne pas dépasser un certain nombre de jours afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble. Plusieurs normes existent :

- *Valeur cible* : niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble ;

- *Valeur limite* : niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir et de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble ;
- *Objectif de qualité* : niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

	Seuils annuels			Seuils horaires	
	Valeurs limites	Objectif de qualité	Valeurs cibles	Seuil de rec. et d'info.	Seuils d'alerte
O ₃		<i>Seuil de protection de la santé :</i> Pour le max journalier de la moyenne sur 8h : 120 µg/m ³ pendant une année civile.	<i>Seuil de protection de la santé :</i> 120 µg/m ³ pour le max journalier de la moyenne sur 8h à ne pas dépasser plus de 25 heures par année civile en moyenne calculée sur 3 ans. Cette valeur cible est applicable à compter de 2010.	<i>En moyenne horaire :</i> 180 µg/m ³ .	<i>Seuil de protection sanitaire pour toute la population, en moyenne horaire :</i> 240 µg/m ³ sur 1h. <i>Seuils d'alerte pour la mise en oeuvre progressive de mesures d'urgence, en moyenne horaire :</i> - 1 ^{er} seuil : 240 µg/m ³ si dépassé pendant 3h consécutives - 2 ^{ème} seuil : 300 µg/m ³ si dépassé pendant 3h consécutives - 3 ^{ème} seuil : 360 µg/m ³
NO ₂	<i>En moyenne annuelle, depuis le 01/01/2010 :</i> 40 µg/m ³ . <i>En moyenne horaire, depuis le 01/01/2010 :</i> 200 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 18h/an.		<i>En moyenne annuelle :</i> 40 µg/m ³ .	<i>En moyenne horaire :</i> 200 µg/m ³ .	<i>En moyenne horaire :</i> - 400 µg/m ³ dépassé pendant 3h consécutives. - 200 µg/m ³ si dépassement de ce seuil la veille, et risque de dépassement le lendemain.
PM ₁₀	<i>En moyenne annuelle, depuis le 01/01/2005 :</i> 40 µg/m ³ . <i>En moyenne horaire, depuis le 01/01/2005 :</i> 50 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 135j/an.		<i>En moyenne annuelle :</i> 35 µg/m ³ .	<i>En moyenne journalière (calculée de 0h à 24h) :</i> 50 µg/m ³ .	<i>En moyenne journalière (calculée de 0h à 24h) :</i> 80 µg/m ³ .
PM _{2,5}	<i>En moyenne annuelle, 28 µg/m³ pour l'année 2011, puis décroissant linéairement chaque année pour atteindre 25 µg/m³ en 2015.</i>	<i>En moyenne annuelle :</i> 10 µg/m ³ .	<i>En moyenne annuelle :</i> 20 µg/m ³ .		

Tableau I.1 : Normes françaises à long terme et court terme pour l'O₃, le NO₂, les PM₁₀ et PM_{2,5} ; source : <http://www.airparif.asso.fr>

Les concentrations de NO₂ à proximité du trafic routier dépassent chaque année la valeur limite de 40 µg/m³ en moyenne annuelle (Airparif, 2011a). De plus, le seuil de recommandation et d'information fixé à 200 µg/m³ pour une moyenne d'une heure a été dépassé tous les ans depuis 2006 à proximité du trafic routier. Les oxydes d'azote jouent aussi un rôle important dans la formation de l'ozone, polluant présentant un risque sanitaire et au dessus des normes annuelles et journalières.

La valeur cible pour l'O₃ en 2010, fixée à 120 µg/m³ maximum sur une moyenne de 8h à ne pas dépasser plus de 25 jours par an, n'a pas été dépassée en 2010 et ne l'est plus depuis 2006. Cependant, son dépassement va beaucoup dépendre des conditions météorologiques durant la période estivale. Un épisode durable de temps ensoleillé ou une canicule comme en 2003 ou en 2006 vont conduire au dépassement de ce seuil. L'objectif de qualité, fixé en France, a le même objectif que la valeur cible mais est beaucoup plus sévère. Il est aussi fixé à 120 µg/m³ pour le maximum journalier de la moyenne sur 8 heures mais pendant une année civile. Il est dépassé tous les ans aussi bien dans l'agglomération parisienne qu'en niveau de fond. A court terme, le seuil d'information et de recommandation fixé à 180 µg/m³ pour une moyenne d'une heure, est dépassé chaque année dans un ou plusieurs sites parisiens, une ou plusieurs fois dans l'année suivant les conditions météorologiques. Le seuil d'alerte fixé à 240 µg/m³ est lui aussi fréquemment dépassé.

La valeur limite annuelle de 40 µg/m³ pour les PM₁₀ a été dépassée en 2010 dans les stations de mesure proches du trafic routier. La valeur limite établie au niveau journalier de 50 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 35 jours par an, a, quant à elle, était fréquemment dépassée par toutes les stations à proximité du trafic depuis 8 ans. Les seuils à court terme ont été dépassés récemment en 2007, en 2009, et en 2011.

I.3. Facteurs de variabilité spatiale et temporelle de la pollution atmosphérique

Les concentrations de polluants de l'atmosphère vont varier selon les sources d'émission et les conditions météorologiques qui peuvent entraîner des dépassements de seuils à court et long terme (fig. I.3). Ces facteurs sont détaillés dans les deux parties suivantes.



Figure I.3 : Évolution des polluants de leurs sources à leur concentration dans l'atmosphère ; d'après Oke, 1987

I.3.1. Les sources d'émission

Les polluants primaires sont émis par différentes sources d'origine anthropique (transport, industrie, bâti, etc.) et naturel (substrat, végétaux, etc.). En 2001, Lenschow *et al.* ont développé à Berlin une méthodologie basée sur l'additivité de différents niveaux de concentrations de

particules : niveau local, du fond urbain et du fond régional. Cette méthodologie permet de connaître l'origine géographique des particules et leurs sources d'émission (Airparif, 2011b ; Langner *et al.*, 2011a ; Gherzi *et al.*, 2012). Le niveau de fond régional est principalement dû à l'importation des particules. A ce niveau s'ajoute la pollution du fond urbain qui est la pollution émise par l'agglomération (chauffage urbain, trafic routier, industries, réactions chimiques, *etc.*). Le niveau de pollution locale s'additionne aux deux autres niveaux. Il dépend essentiellement de la variabilité du trafic routier car il est mesuré à proximité du trafic routier et dépend essentiellement des variabilités de ce dernier. Cette méthodologie ne s'applique actuellement qu'aux particules mais indique la multiplicité des sources d'émission des polluants primaires qui peuvent avoir différentes origines géographiques.

De nombreuses études montrent que les polluants primaires tels que le NO_x , PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ sont plus élevés à proximité des sources d'émission (Molnàr, 2002 ; Johansson, 2007 ; Pandey, 2008 ; Airparif, 2011b). Les concentrations de ces polluants sont plus fortes dans les stations au centre des agglomérations, là où la concentration d'activité est plus importante qu'en zone rurale (Nguyen et Kim, 2006). Par ailleurs, elles seront plus élevées la journée lorsque les activités industrielles et le chauffage urbain émettent le plus et lorsque la densité de trafic est la plus importante ; c'est-à-dire aux heures pendulaires du trafic routier et durant la semaine.

A une échelle fine, les taux de NO_2 , des PM_{10} et des $\text{PM}_{2,5}$ sont fortement variables et dépendants essentiellement du flux de circulation et de sa proximité (Kaur *et al.*, 2006 ; Airparif, 2009b ; Airparif, 2009d ; Buonanno *et al.*, 2011). Les pics de particules s'observent lorsque les piétons sont proches du trafic routier, à côté d'un véhicule à l'arrêt ou au redémarrage lors du passage du feu rouge au feu vert. A notre connaissance, peu d'autres sources sont mises en relief à cette échelle fine mais, par exemple, la fumée de cigarette à proximité des capteurs fait par exemple augmenter les concentrations de particules. A vélo et en voiture, les maxima de taux de particules sont fréquemment observés lorsque le véhicule est à l'arrêt derrière un autre véhicule ou dans un flux de circulation ralenti (Gulliver et Briggs, 2005 ; McNabola *et al.* 2008).

La figure I.4 est une représentation schématique des émissions et des phénomènes atmosphériques qui vont influencer les concentrations de polluants dans l'atmosphère. Les polluants primaires sont émis par différentes sources puis elles sont transportées ou dispersées par les vents à différentes altitudes. Le transport par des vents d'altitude va entraîner l'import de la pollution de l'air d'une région à une autre (Dudoit Fichet, 2006). Une partie de ces polluants se transforme dans l'atmosphère en polluants secondaires (O_3 par exemple), à partir de transformations chimiques et souvent du rayonnement solaire.

L'ozone va se former par photochimie essentiellement à partir du NO_2 . Ses concentrations sont plus faibles à proximité du trafic routier où l' O_3 formé est immédiatement attaqué par le NO recréant le NO_2 . Cette réaction de l' O_3 par le NO explique aussi que les concentrations de ce

polluant soient plus faibles dans le centre de l'agglomération et durant les heures de pointe du trafic routier quand les taux de NO sont les plus forts. Pour les mêmes raisons, les concentrations d'O₃ sont en moyenne plus faibles en semaine que pendant le week-end (Pont et Fontan, 2001 ; Qin *et al.*, 2004 ; Atkinson-Palombo, 2006).

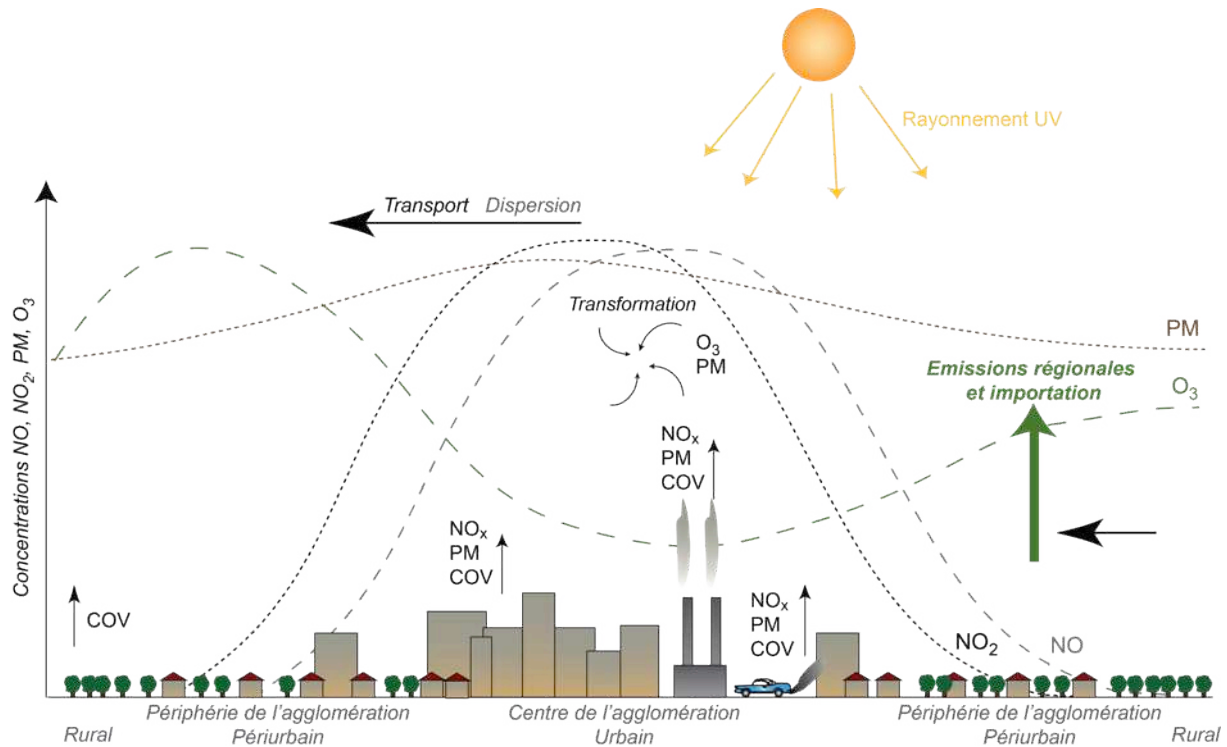


Figure I.4 : Représentation schématique des émissions et des concentrations de NO_x, PM et O₃ à l'échelle régionale ; adaptée d'après Airparif et Umweltministerium Baden-Württemberg, 1995

Une fois les polluants émis ou transformés chimiquement, ils vont se déplacer dans l'atmosphère et les conditions météorologiques à différentes échelles vont faciliter la dispersion des polluants ou, à l'inverse, leur accumulation.

I.3.2. L'influence des conditions météorologiques

La concentration de pollution dans l'atmosphère va dépendre des conditions météorologiques à différentes échelles. A l'échelle synoptique, les types de temps vont influencer sur la stabilité verticale, le vent et les nuages. A l'échelle topoclimatique, l'altitude, la continentalité vont agir sur la hauteur de la couche limite et sur la formation de brises. A l'échelle microclimatique, la morphologie urbaine (couche superficielle du sol, structure urbaine) vont influencer les mouvements de l'air. Tous ces facteurs développés dans les sous-parties suivantes agissent sur l'accumulation ou la dispersion des polluants.

Influence des conditions météorologiques synoptiques

Certaines situations atmosphériques, particulièrement lors de conditions anticycloniques avec pas ou peu de vent, empêchent la dispersion des polluants. Fréquemment, lors d'une situation anticyclonique, l'air s'affaisse et la pollution atmosphérique reste bloquée près du sol engendrant une forte concentration de pollution. De plus, une situation anticyclonique favorise un ciel clair et un fort rayonnement ultraviolet indispensable à la formation de l'ozone par photochimie (Vukovich et Sherwell, 2003 ; Camalier, 2007). De plus, de fortes températures permettent de catalyser la production d'ozone en facilitant la production des radicaux hydroxyles.

A l'inverse, les conditions dépressionnaires favorisent la dispersion et la dilution des polluants. Les mouvements ascendants facilitent la formation d'une couverture nuageuse qui empêche un fort rayonnement solaire et la formation de l'ozone. Ils entraînent souvent de forts gradients de pression et des vents forts dispersant la pollution horizontalement et verticalement. Les précipitations, plus fréquentes lors de dépression, lessivent la pollution en la plaquant vers le sol.

A une échelle synoptique, les mouvements des masses d'air peuvent apporter de l'ozone et des particules d'une autre région ou d'un autre pays. La formation de l'ozone nécessite quelques heures, durant lesquelles les masses d'air se déplacent avec les vents dominants. Lors de la canicule de 2003, l'ozone qui a été transporté du sud de l'Angleterre puis de la Belgique et de l'Allemagne s'est ajouté à celui formé sur la région à cause des conditions météorologiques particulières (fort rayonnement solaire et des températures très hautes) pour atteindre des taux exceptionnellement forts (Airparif, 2005).

Influence des conditions météorologiques à l'échelle locale

La couche limite atmosphérique CLA est la couche de la troposphère en contact avec le sol et directement influencée par la surface (friction, réchauffement, refroidissement, effets dus au relief, *etc.*) à une échelle de quelques heures à une journée. Sa taille varie de quelques centaines de mètres à un ou deux kilomètres en fonction principalement de paramètres météorologiques (vent, température, humidité, insolation), mais aussi de la topographie et du type d'environnement. L'écoulement de l'air dans la CLA est freiné par la rugosité de surface mais le vent y est par conséquent très turbulent. Ses variations vont influencer sur la dilution des polluants. La CLA va évoluer au cours de la journée, dépendant essentiellement du chauffage de la surface (fig. I.5). Près du sol, la couche de surface est présente tout au long de la journée et à une épaisseur approximative de 10% de la CLA. La journée, une couche thermiquement instable et convective va se développer avec le réchauffement du sol, c'est la couche de mélange. Le brassage de l'air de la couche de mélange favorise la formation de l'O₃. La nuit, le

refroidissement de la surface va donner naissance à une couche plus stable, la couche limite stable. La couche résiduelle au dessus est le lieu de déclin de la turbulence induite par la convection créée la journée. Les particules et le dioxyde d’azote contenus dans la couche limite vont soit se concentrer vers la surface, soit rester piégés dans la couche résiduelle. L’ozone piégé dans la couche limite va être détruit au contact de l’oxyde d’azote NO. L’ozone situé au dessus de la couche limite nocturne va se maintenir durant la nuit. Durant les situations radiatives, les concentrations mesurées dans les stations situées en altitude peuvent être plus élevées que les stations situées à faible altitude la nuit (Martin, 2008).

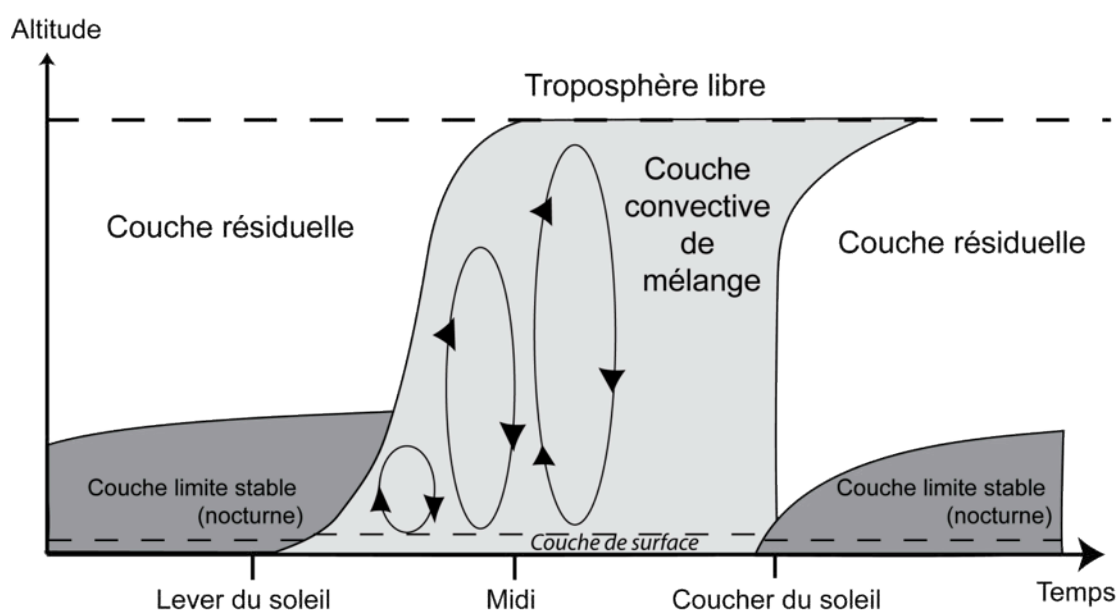


Figure I.5 : Schématisation de l'évolution journalière de couche limite atmosphérique sur un sol plat, adaptée d'après Stull, 1988 ; Toupance, 1998

Le phénomène nocturne s'accroît lors d'inversion thermique (Oke, 1987). La figure I.6 présente la variation des températures et de la couche limite urbaine lors d'une situation sans inversion thermique, fréquemment le jour (A) et lors d'une situation, avec inversion thermique, fréquemment le jour (B). La température décroît habituellement avec l'altitude et facilite une ascendance de l'air (fig. I.6, A). Ce phénomène permet la dispersion verticale des polluants. Dans certains cas, particulièrement en période hivernale et en situation radiative, le phénomène d'inversion des températures est observé (fig. I.6, B). En fin de journée, l'air au contact du sol se refroidit rapidement. Il y a une formation d'inversion de température qui peut atteindre jusqu'à quelques centaines de mètres d'altitude. L'ascendance de l'air est alors impossible, les polluants se retrouvent donc bloqués au niveau du sol. Lors d'une période d'inversion thermique, les pics de pollution aux particules et au dioxyde d'azote sont plus fréquents. Dès que le sol se réchauffe, en milieu de matinée souvent, le phénomène d'inversion thermique disparaît et l'air redevient instable, permettant des mouvements verticaux de l'air (convection).

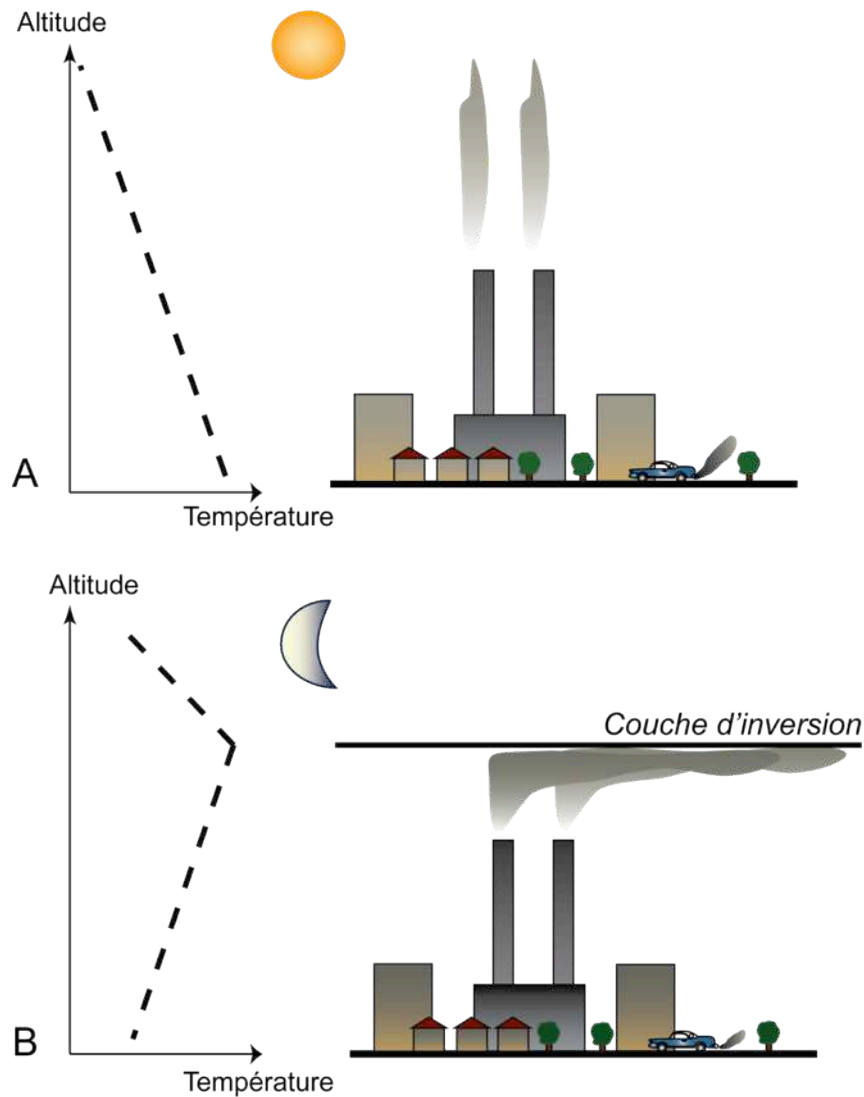


Figure I.6 : Variation de la couche limite urbaine entre le jour (A) et la nuit avec une inversion thermique (B)

Au sein de la CLA, des brises thermiques peuvent s'installer lors de situations radiatives. Les brises thermiques avec une vitesse de vent inférieure à 2 m/s concentrent la pollution en certaines zones d'une ville (Dahech *et al.*, 2006). Ce sont de faibles vents locaux et à alternance quotidienne, créés par des différences de température dans la couche inférieure de l'atmosphère (Beltrando, 2004). A l'échelle de la région, les brises dites de campagne, sont dues aux différences de températures existantes entre la ville et la campagne (Escourrou, 1991 ; Bridier et Quénot, 2006). Elles vont de la périphérie des villes où l'air est plus frais, au centre des villes, plus chaud (chaleur sensible plus importante et émissions de chaleur anthropique). Ces brises de campagne se déclenchent généralement la nuit quand le gradient thermique entre la ville et la campagne est relativement élevé. Olivier Cantat, dans son étude sur les îlots de chaleur urbains parisiens, met en évidence quelques situations à 6h UTC avec des brises de campagne (Cantat, 2004).

Influence de la morphologie urbaine sur les microclimats et la pollution de l'air

A une échelle plus localisée, des brises thermiques naissent entre les quartiers les plus chauds et les zones les plus fraîches. Elles sont moins épaisses (moins de 50 m) et plus brèves. Elles sont canalisées par les rues. Les espaces verts sont globalement plus frais que les zones bâties car ils consomment plus de chaleur latente. Une brise locale diverge des îlots de fraîcheur vers les espaces plus chauds. Les zones de végétation, à Paris, entraînent la dispersion des polluants vers les zones plus urbanisées. Il en est de même pour la Seine, plus fraîche que les zones bâties. Les zones urbanisées se réchauffent plus vite que les cours d'eau. Une brise s'écoule donc de la Seine vers les zones les plus densément peuplées qui la bordent (Bridier et Quénol, 2006).

La structure urbaine (hauteur du bâti, espacement entre le bâti et matériaux) va influencer sur les mouvements d'air au niveau de la rue (Gandemer et Guyot, 1981). Lorsque le vent est perpendiculaire à une rue encaissée (rue dite *canyon*), la dispersion des particules et du dioxyde d'azote est beaucoup plus difficile que dans une rue large, particulièrement quand la direction du vent est perpendiculaire à la rue (Vardoulakis *et al.*, 2005 ; Weber *et al.*, 2006). En outre, l'ensoleillement est généralement plus faible, donc ces rues sont plus sujettes aux inversions thermiques. Par ailleurs, les intersections entre plusieurs rues peuvent aussi entraîner une concentration de polluants au centre (Wang *et al.*, 2011).

Les particules et le dioxyde d'azote sont émis dans l'atmosphère principalement par le trafic routier et le secteur résidentiel tertiaire, et dans une moindre mesure par les industries. Ces polluants vont être dispersés, transportés et/ou transformés en polluant secondaire (l'ozone par photochimie, par exemple), dépendant de conditions météorologiques synoptiques, topoclimatiques et microclimatiques. Dans l'atmosphère, les polluants ont des impacts sanitaires sur la population d'où des normes annuelles et journalières pour limiter les risques. Les concentrations annuelles d'ozone, de particules et de dioxyde d'azote dépassent quasiment tous les ans les objectifs de qualité et les valeurs limites en fond ou à proximité du trafic. Le seuil de recommandation et d'information au niveau journalier est dépassé plusieurs jours par an pour ces polluants. Pour évaluer et diminuer l'exposition de la population à ces polluants, ils sont mesurés à différentes échelles spatiale et temporelle, et complétés de modèles. Le chapitre suivant présente les mesures et l'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air.



Chapitre II

Mesures et évaluation de l'exposition à la pollution de l'air

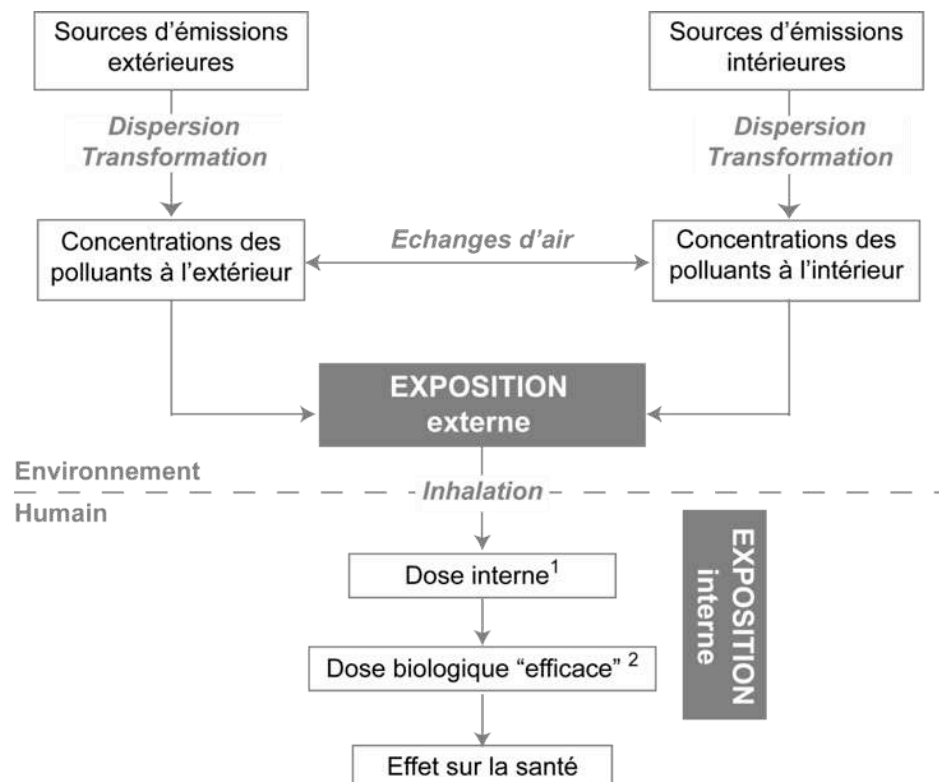
L'ozone, le dioxyde d'azote et les particules ont un risque sanitaire pour les individus à court et à long terme (Dab *et al.*, 1996 ; Kampa et Castenas, 2008). Pour diminuer ce risque, il est nécessaire d'évaluer l'exposition de chaque individu à la pollution de l'air. Celle-ci est estimée quotidiennement à l'aide de réseaux régionaux de stations de mesure automatique. Des campagnes de mesure aux échelles régionale ou locale spécifiques permettent d'améliorer les connaissances sur les variabilités spatiale et temporelle des polluants et de pouvoir les modéliser.

Ce chapitre définit l'exposition à la pollution de l'air, puis présente les mesures de la pollution de l'air extérieur à différentes échelles et quelques modèles numériques qui permettent d'estimer l'exposition individuelle à la pollution de l'air.

II.1. L'exposition individuelle à la pollution de l'air

Les premières notions de l'exposition humaine à la pollution atmosphérique ont été définies dans les années 1970, à l'aide notamment d'études sur la mobilité de la population (Szalain, 1972 ; Chapin, 1974 ; Duan, 1982 ; Ott, 1984 ; Fugaš, 1986). « *L'exposition est définie comme un contact entre l'homme et son environnement avec un contaminant d'une concentration spécifique durant un certain laps de temps. L'unité de mesure est la concentration par le temps* » définition de l'Académie des Sciences Américaine, 1991. Elle est donc caractérisée par la concentration de polluants à laquelle une personne est soumise durant un laps de temps (Ambroise *et al.*, 2005). Cette exposition va varier selon les polluants, l'activité et l'individu lui-même. Ce n'est pas un seul polluant mais souvent un ensemble de polluants auquel l'individu est exposé, mais l'évaluation de cette synergie est encore très difficile à mettre en œuvre et se fait donc souvent polluant par polluant (Airparif, 2008a).

La figure II.1 proposée par Derbez *et al.* en 2001 représente schématiquement les étapes à considérer pour évaluer le risque sanitaire. Deux types d'exposition sont proposés : l'exposition externe, correspondant à l'exposition aux concentrations de polluants avant l'inhalation, et l'exposition interne, après l'inhalation, dans l'organisme de l'individu. L'exposition interne est différente pour chaque individu, à même dose, selon les facteurs physiopathologiques de l'individu (âge, sexe, état de la santé, fréquence pulmonaire, *etc.*). Elle est difficile à quantifier. Le risque sanitaire va dépendre de l'exposition interne et de l'exposition externe.



¹ La dose interne est la quantité de polluants qui atteint le système respiratoire de l'individu.

² La dose biologique "efficace" est quant à elle, celle qui produit un risque pour la santé.

Figure II.1 : Représentation schématique des étapes à considérer pour évaluer le risque sanitaire personnel dû aux polluants atmosphériques ; adaptée d'après Derbez *et al.*, 2001 et Airparif, 2008a

Actuellement, l'exposition externe est plus facilement mesurée par des mesures fixes ou semi-mobiles des concentrations de polluants à l'intérieur et/ou à l'extérieur. Deux types d'information sont alors croisés : la localisation de l'individu au cours de la journée et la concentration de la pollution dans les lieux où l'individu se trouve. La variabilité de l'exposition individuelle à la pollution de l'air va donc dépendre, d'une part, de la variabilité spatiale et temporelle des concentrations des polluants et d'autre part, des activités et de leur durée. Selon ces paramètres, l'individu sera plus ou moins exposé à la pollution de l'air et susceptible d'avoir des impacts sur sa santé à court et long terme.

Les études sur la mesure de l'exposition individuelle à la pollution de l'air se sont multipliées depuis une vingtaine d'années (Limass *et al.*, 1993 ; Derbez *et al.*, 2001 ; Chow *et al.*, 2002 ;

Edwards *et al.*, 2001 ; Ballesta *et al.*, 2006 ; Kaur *et al.*, 2007 ; Airparif, 2008a ; Ashmore et Dimitroulopoulou, 2009). L'idéal pour mesurer l'exposition humaine au plus près de la réalité est de réaliser une campagne de mesure à l'aide de plusieurs individus portant des capteurs tout au long de la journée, durant leurs activités intérieures et extérieures, et durant leurs trajets. Plusieurs campagnes ont ainsi été réalisées à l'aide d'échantillonneurs actifs ou passifs (Gonzalez-Flesca *et al.*, 2000 ; Edwards *et al.*, 2001 ; Ambroise *et al.*, 2005 ; Ballesta *et al.*, 2006 ; Goodman *et al.*, 2007 ; Kot-Wasik *et al.*, 2007). Les échantillonneurs actifs mesurent les concentrations de polluants avec un pas de temps de quelques secondes à plusieurs minutes. L'air peut être collecté dans des échantillonneurs passifs puis analysé ensuite en laboratoire. Les individus portant ces échantillonneurs peuvent être aléatoires ou représentatifs d'individus particuliers : par exemple, les enfants en mesurant leur exposition à l'école et dans les transports les y amenant (Ashmore et Dimitroulopoulou, 2009) ou un ensemble de travailleurs exposés à la pollution sur leur lieu de travail (Airparif, 2008b ; Cattaneo *et al.*, 2010).

Par exemple, en 2007, une étude exploratoire a été menée en Île-de-France par Airparif, association appartenant au réseau des Associations, Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA), sur l'exposition d'un échantillon de franciliens (Affset et Airparif, 2007 ; Airparif, 2008a). 150 volontaires ont porté pendant deux jours, en hiver et en été, des échantillonneurs passifs de dioxyde d'azote, de benzène et de formaldéhydes. Les résultats ont montré que les concentrations de formaldéhydes étaient plus importantes à l'intérieur. Les niveaux de dioxyde d'azote et de benzène étaient, quant à eux, plus élevés à l'extérieur et comparables à ceux mesurés par les stations de fond et de trafic appartenant au réseau de mesures automatiques de Airparif. Les taux sont plus forts lors des déplacements mais très variables suivant le type de transport utilisé, selon le temps de parcours et la densité de trafic sur les routes fréquentées.

Cette méthode demande beaucoup de matériel et peut être une contrainte pour les individus souvent volontaires (port du capteur). Les capteurs actifs sont souvent plus volumineux et plus coûteux que les capteurs passifs. Les mesures directes à l'aide de capteurs actifs se font donc généralement avec un nombre de participants beaucoup moins importants dans l'optique de caractériser la pollution de proximité. L'évaluation peut aussi être indirecte à l'aide de modèles mathématiques en croisant les concentrations de polluants dans les lieux fréquentés et le temps passé dans chacun d'eux (Jeannée *et al.*, 2006).

Cependant, l'appréciation de l'exposition externe à la pollution de l'air de la population se limite souvent à la surveillance de la qualité de l'air extérieur à l'aide d'un réseau automatique de mesure à une échelle régionale et aux modèles de pollution de l'air (Lameloise, 2007). Les campagnes de mesure à une échelle régionale ou locale permettent d'améliorer les connaissances sur la variabilité temporelle et spatiale des concentrations des polluants et de

perfectionner les modèles de pollution atmosphérique. Les mesures de la pollution de l’air dans des micro-environnements caractérisent le mieux l’exposition à la pollution de l’air. Ces différentes mesures sont développées dans la partie suivante.

II.2. Les mesures de la pollution de l’air

La pollution de l’air se mesure à l’aide de réseaux de stations automatiques fixes pour surveiller la qualité de l’air quotidiennement, et de mesures plus ponctuelles, sous forme de campagne de mesures, pour répondre à une problématique précise.

II.2.1. Les réseaux de mesures

La plupart des grandes agglomérations dans le monde dispose d’un réseau de mesures automatiques permanent de concentrations de polluants atmosphériques. L’Organisation Mondiale de la Santé dispose d’une base de données issue de stations automatiques pour environ 1100 villes dans 91 pays (<http://www.who.int/>). Les polluants les plus fréquemment mesurés sont le dioxyde de soufre, les particules, l’ozone et le dioxyde d’azote. D’autres polluants sont aussi mesurés selon la problématique liée à l’emplacement de la station de mesures (à proximité de sources de pollution, en situation de pollution de fond...). En France, toutes les agglomérations de plus de 100 000 habitants disposent d’un réseau de stations automatiques mesurant en continu les concentrations de certains polluants primaires et secondaires, géré par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l’Air (AASQA ; <http://www.atmo-france.org/fr/>).

Ces stations ont plusieurs objectifs. Au quotidien, elles permettent d’évaluer l’exposition à la pollution de l’air en mesurant en continu les niveaux de pollution, d’informer la population en couplant les mesures aux modèles de qualité de l’air et d’alerter en cas de dépassements des seuils mis en place pour limiter les risques sanitaires. A plus long terme, les données issues de ces stations permettent d’étudier les variations temporelles et spatiales de la pollution de l’air, de suivre les évolutions de la qualité de l’air, en les comparant aux objectifs de qualité de l’air, et d’analyser les effets de la pollution de l’air sur la santé.

Afin de répondre à ces objectifs, les stations sont placées selon certains critères afin qu’elles soient représentatives de sites considérés comme semblables ne se trouvant pas à proximité immédiate (ADEME, 2002). Elles sont classées selon la densité de population, le type d’espace et d’émissions autour des stations. Globalement ce classement se base sur des recommandations de l’OMS et des lignes directrices pour l’Union Européenne. En Europe, trois classifications différentes servent de base pour l’implantation des stations. Elles sont issues :

- des travaux du centre thématique sur l'air et le changement climatique (ETC-ACC, European Topic Center on Air and Climate Change) pour l'agence européenne de l'environnement dans le cadre du projet « EUROAIRNET » (Larssen *et al.*, 1999);
- de la décision du conseil européen 97/100/EC, nommée « Eol », sur l'échange d'informations sur la qualité de l'air au niveau européen ;
- des directives européennes relatives à la qualité de l'air (96/62/CE, 99/30/CE, 2000/69/CE et 2002/3/CE).

Ces classifications ne sont pas homogènes mais c'est surtout le nombre de classes qui diffère selon les pays. Trois grandes classes sont généralement définies au niveau mondial pour correspondre à une représentativité à différentes échelles :

- Les stations « planétaires » informent sur les évolutions à long terme de la composition de l'atmosphère. Elles doivent être représentatives d'un rayon de plus de 100 km.
- Les stations « régionales » sont représentatives de la pollution de l'air à une échelle climatologique régionale et donc des flux météorologiques arrivant d'une zone donnée.
- Les stations « locales » sont représentatives de la pollution de l'agglomération et de proximité émise par des sources anthropiques locales.

En France, différents acteurs du dispositif de mesure et surveillance de la qualité de l'air (le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air, le laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, la fédération ATMO et l'ADEME) ont collaboré pour rédiger un guide d'implantation des stations. Ce guide définit 7 classes de stations selon la proximité des sources d'émission (trafic, industrie) et en niveau de fond selon l'éloignement aux agglomérations (Tab. II.1 ; ADEME, 2002). En région parisienne, l'association Airparif a défini plusieurs classes de stations :

- Les stations trafic, situées à quelques mètres au maximum de la circulation routière, source principale des polluants mesurée par ces stations ;
- Les stations de fond (urbaine, périurbaine et rurale), représentatives du niveau de fond de la pollution de l'air ;
- La station d'observation située au troisième étage de la Tour Eiffel.

Les données issues de ces stations sont utilisées dans cette thèse pour caractériser les variabilités spatiale et temporelle des concentrations d'O₃, de NO₂, PM₁₀ et PM_{2,5} (*cf.* partie II).

		Objectifs
Stations de fond réalisant un suivi de l'exposition moyenne des personnes et de l'environnement	Station urbaine	Suivi de l'exposition moyenne de la population aux phénomènes de pollution atmosphérique dits de "fond" dans les centres urbains.
	Station périurbaine	<p>Suivi de la pollution photochimique notamment l'ozone et ses pré-curseurs et éventuellement les polluants primaires et suivi du niveau d'exposition moyen de la population aux phénomènes de pollution atmosphérique dits de "fond" à la périphérie du centre urbain.</p> <p>Note : nous n'avons pas repris le terme "suburbain" qui apparaît dans la directive Eol mais qui pose des difficultés en terme de définition de l'urbanisation au niveau européen.</p>
	Station rurale régionale	Surveillance de l'exposition des écosystèmes et de la population à la pollution atmosphérique de "fond" notamment photochimique à l'échelle régionale. Elles participent à la surveillance de la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire et notamment dans les zones rurales.
	Station rurale nationale	Surveillance dans les zones rurales de la pollution atmosphérique dite de "fond" issue des transports de masses d'air à longue distance, notamment transfrontaliers.
Station de proximité	Industrielle	Fournir des informations sur les concentrations mesurées dans des zones représentatives du niveau maximum auquel la population riveraine d'une source fixe est susceptible d'être exposée, par des phénomènes de panache ou d'accumulation.
	Trafic	Fournir des informations sur les concentrations mesurées dans des zones représentatives du niveau maximum d'exposition auquel la population située en proximité d'une infrastructure routière est susceptible d'être exposée
	Station d'observation spécifique	Besoins spécifiques tels que l'aide à la modélisation ou la prévision, le suivi des émetteurs autres que l'industrie ou la circulation automobile (pollution de l'air d'origine agricole...), le maintien d'une station "historique" etc...

Tableau II.1 : Classification et objectifs des stations françaises du réseau ASQAA ; source : ADEME, 2002

Le critère d'implantation et de classification des stations selon la densité de population et les sources d'émission est discutable. Il ne prend pas en compte le relief, par exemple, qui peut influencer la variabilité des polluants (Martin, 2008). Dans la partie II, l'étude de la variabilité spatiale des concentrations d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀ indique une distribution temporelle et des niveaux similaires pour plusieurs stations urbaines et périurbaines en région parisienne (cf. chapitre V). Les deux classes sont peu distinctes en Île-de-France. A l'inverse, dans une même classe, la variabilité temporelle et les niveaux des concentrations peuvent varier selon les stations. De nouvelles classifications sont proposées en prenant en compte l'occupation du sol et

le site de la station, à partir des données du réseau déjà existant sur une série temporelle longue et de modèles (Flemming *et al.*, 2005 ; Janssen *et al.*, 2012 ; Joly et Peuch, 2012). Les stations pourraient être reclassifiées à l'aide de taux déjà mesurés et de modèles pour être plus représentatives de sites considérés comme semblables.

Le réseau de stations de mesure automatique permet de surveiller et d'évaluer l'exposition à la pollution de l'air de l'ensemble de la population d'une région. Des campagnes de mesure à l'échelle régionale et locale permettent d'améliorer les connaissances sur les variabilités des polluants, ainsi que de mieux appréhender l'exposition à la pollution de l'air de chaque individu.

II.2.2. Les campagnes de mesure

Les campagnes de mesure sont temporaires en un point ou une aire géographique en vue de disposer d'informations sur les concentrations d'un ou plusieurs polluants pour améliorer les connaissances sur les variabilités du polluant ou ses impacts. Les campagnes de mesure peuvent être à plusieurs échelles temporelles et spatiales différentes, avec des moyens financiers et matériels différents. Ces mesures peuvent être mobiles et/ou fixes.

Plusieurs grandes campagnes ont été réalisées ces dernières années sur les aérosols et les particules dans des métropoles. Le projet européen MEGAPOLI (Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation) a commencé en 2008 avec un consortium de vingt cinq équipes françaises et européennes (<http://megapoli.info/>). Les objectifs sont de décrire et de quantifier les impacts des mégapoles sur la qualité de l'air et la composition chimique de la troposphère à l'aide d'une modélisation mise en œuvre pour plusieurs mégapoles européennes (Londres, Paris, Istanbul, *etc.*) et internationales (Mexico, Pékin, Le Caire, *etc.*). Pour cela, une campagne de mesure a été faite en région parisienne été 2009 et hiver 2009/10 visant à mieux quantifier les sources primaires et secondaires de l'aérosol organique afin de servir d'exemple pour les mégapoles situées aux latitudes tempérées. Un vaste réseau instrumental a été mis en œuvre avec des stations fixes, des stations mobiles et des avions de recherche de type SAFIRE ATR-42 en été et SAFIRE/PIPER AZTEC en hiver. Ces mesures ont permis de récolter des informations sur la composition chimique des particules, leurs propriétés physico-chimiques, des mesures en phase gazeuse, des variables météorologiques et des profils lidar et d'améliorer ainsi les connaissances sur les aérosols pour évaluer leurs impacts (Brands *et al.*, 2011 ; Royer *et al.*, 2011 ; Healy *et al.*, 2012 ; Ringuet *et al.*, 2012). Plusieurs grands autres projets sont lancés à des niveaux nationaux ou internationaux, tel que ClearFlo à Londres (<http://www.clearflo.ac.uk/>) ou Milangro à Mexico (DeCarlo *et al.*, 2008 ; Stone *et al.*, 2008 ; Palancar *et al.*, 2013).

Des mesures avec des dispositifs matériels et financiers sont aussi réalisées par des associations et des laboratoires à l'aide de laboratoires mobiles (camion par exemple), de capteurs portables

ou des « tubes à diffusion passive ». Par exemple, des campagnes de mesure ont été réalisées par l’équipe du département de climatologie de l’université d’Umbolt à Berlin, sur plusieurs sites à Berlin et à Karlsruhe pour mesurer la variabilité des particules et l’influence de la végétation à l’aide de stations fixes, d’un camion de mesures et de tubes à diffusion passive, analysés ensuite en laboratoire (Langner *et al.*, 2011a ; Langner *et al.*, 2011b). De nombreuses campagnes de ce type existent en ciblant un ou plusieurs polluants et avec des thématiques différentes.

Cette thèse s’inscrit dans la continuité de mesures itinérantes qui ont été réalisées à pied ou en vélo (Quénol *et al.*, 2006 ; Dahech, 2007 ; Martin et Carrega, 2009 ; Glandus *et al.*, 2011). Nicolas Martin a réalisé une campagne de mesure des taux d’ozone d’avril à septembre 2007 à Nice et ses alentours à l’aide d’un capteur portatif placé sur un vélo pour connaître la variabilité spatiale de l’ozone et ses facteurs à une échelle locale. Les autres campagnes ont mesuré les concentrations de CO et/ou de NO₂ à Paris, à Sfax, à Limoges dans le but d’évaluer la pollution de proximité due au trafic routier.

II.2.3. La mesure de la pollution de proximité

La notion de pollution de proximité est étroitement liée à l’exposition d’un individu. Un humain est exposé à la pollution de proximité lors de ses trajets, ses activités et les lieux fréquentés. La pollution de proximité est « *la pollution ambiante qui ne résulte pas majoritairement de transferts atmosphériques à longue distance et est déterminée par le voisinage des sources fixes ou mobiles* » (Roussel et Charles, 2006). Afin de caractériser l’exposition individuelle à la pollution atmosphérique, de nombreuses études mesurent la pollution de proximité dans des micro environnements à l’aide de capteurs actifs ou passifs (logements, bâtiments publics, transport, *etc.* ; Adams *et al.*, 2001 ; Guo *et al.*, 2003 ; Kaur *et al.*, 2006 ; Almeida *et al.*, 2011).

Les campagnes de mesure dans les bâtiments publics, les écoles ou encore les logements ont mis en évidence depuis une dizaine d’années une pollution de l’air intérieur relativement importante, principalement due aux composés organiques volatiles (formaldéhydes, benzène, *etc.*), aux particules, aux allergènes et au monoxyde de carbone (Mosqueron et Nedellec, 2004 ; Dahech et Beltrando, 2008 ; Labre et Mandin, 2009). Les concentrations de polluants sont souvent plus élevées qu’à l’extérieur, à cause des sources d’émissions intérieures (peintures, meubles, tabac, *etc.*) et le manque de ventilation.

L’association Airparif a réalisé une campagne de mesures des particules PM₁₀ et PM_{2,5} et du dioxyde d’azote dans le métro parisien du 1^{er} au 15 décembre 2008 dans la station Faidherbe-Chaligny (Airparif, 2009c). Deux points de mesures fixes étaient situés sur le quai de la ligne 8, et deux points de mesures à l’extérieur de la station afin d’analyser les transferts de polluants entre l’intérieur et l’extérieur de la station. Les résultats ont montré que les taux de PM₁₀ et de PM_{2,5} étaient en moyenne 2,5 fois supérieurs à ceux mesurés à la surface, avec des maxima durant les

heures de pointe. Les niveaux mesurés correspondent aux observations des mesures réalisées par le réseau de mesures de Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Environnement Souterrain SQUALES de la RATP qui dispose d'une station de mesures continues dans la gare d'Auber sur le RER A. Ces fortes concentrations de particules s'expliquent essentiellement par le système de freinage des métros qui produisent des particules et la remise en suspension des particules lors de la circulation du métro. Les concentrations de dioxyde d'azote dépendent quant-à-elles plus des niveaux mesurés à l'extérieur.

Un grand nombre de campagnes de mesure de pollution de proximité est réalisé dans différents modes de transport (à pied, à vélo, en voiture, en bus, *etc.* ; Gulliver et Briggs, 2007 ; Briggs *et al.*, 2008 ; McNabola *et al.*, 2008 ; Kaur et Nieuwenhuijsen, 2009 ; Buonanno *et al.*, 2011). Elles caractérisent la pollution de l'air au plus près de la circulation routière dans différents micro-environnements, et peuvent mettre en évidence la variabilité spatiale de cette pollution à une échelle locale (Dahech *et al.*, 2006 ; Quénol *et al.*, 2006 ; Boarnet *et al.*, 2011 ; Glandus *et al.*, 2011). Contrairement aux mesures à l'intérieur de bâtiments, ces mesures sont le plus fréquemment mobiles et répétées souvent sur plusieurs trajets différents. Elles mettent en exergue des taux de polluants plus élevés à proximité des sources d'émission et donc du trafic routier.

Ces mesures de la pollution de proximité aident à la réalisation de modèles ou de systèmes d'information géographique qui servent à montrer l'exposition des individus.

II.3. L'évaluation et la modélisation de la pollution de l'air

L'exposition à la pollution de l'air d'un individu peut être indirectement évaluée à l'aide d'un modèle en croisant les concentrations estimées dans un ou plusieurs micro-environnements et le temps passé dans chacun d'eux (Airparif, 2001 ; Jeannée *et al.*, 2006). Les systèmes d'information géographique permettent de spatialiser les concentrations de polluants et de voir l'exposition d'un individu selon son trajet (Gulliver et Briggs, 2005 ; Vienneau *et al.*, 2009). Des applications se développent à partir de ces modèles pour mesurer son exposition à la pollution de l'air. Airparif a, par exemple, mis en place un outil qui permet de calculer son exposition en voiture lors de son trajet domicile-travail en Île-de-France à l'aide d'un questionnaire (<http://www.airparif.asso.fr/divers/exposition-en-voiture>).



La modélisation de la pollution de l'air permet d'informer la population sur son exposition à des niveaux régionaux et à proximité de sources d'émission, particulièrement le trafic routier. Le modèle Esmeralda fournit chaque jour des prévisions chiffrées et cartographiées de la pollution de fond d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules PM10 et PM2.5 pour les régions Île-de-France, Picardie, Centre, Haute et Basse-Normandie, Champagne-Ardenne, Nord-Pas de Calais, Bretagne et Bourgogne. Il permet de prévoir les épisodes de pollution et de faire un bulletin

quotidien de la qualité de l’air accessible au public par la presse et les médias (par exemple, sur le bulletin de la qualité de l’air de France 3). A une échelle plus fine, des modèles permettent de cartographier la pollution à proximité du trafic routier. Un modèle issu du projet européen Heaven (Healthier Environment through Abatement of Vehicle Emission and Noise) utilise les données du trafic routier d’une ville pour évaluer toutes les heures la pollution de l’air émise par ce trafic. Ces modèles permettent de prévoir la qualité de l’air pour le lendemain et d’informer la population à l’aide d’indice : l’indice français ATMO et l’indice européen Citeair. L’indice ATMO a été mis en place à l’initiative du ministère de l’Aménagement du Territoire et de l’Environnement en 1995, afin de qualifier la qualité de l’air d’une unité urbaine homogène de plus de 100 000 habitants. Cet indice est un chiffre allant de 1 (bonne qualité de l’air) à 10 (qualité médiocre ; tab. II.2). Il est déterminé à partir des stations de fond de l’agglomération, en intégrant les principaux polluants atmosphériques, traceurs des activités de transport, urbaines et industrielles (dioxyde de soufre SO_2 , le NO_2 , l’ O_3 , les PM_{10}). L’indice ATMO correspond au sous-indice le plus élevé ; par exemple, si le sous-indice ATMO de l’ O_3 est de niveau 7 et que les autres sont inférieurs, l’indice ATMO sera de 7. L’indice ATMO représente la qualité globale de l’air sur une agglomération et sert avant tout à informer la population.

L’indice européen Citeair est construit sur le même principe avec une échelle allant de 0 à >100, mais en utilisant en plus de l’indice de fond, un indice de trafic basé sur le NO_2 et les PM_{10} . Cet indice est donc plus complet et permet une comparaison de la qualité de l’air au niveau européen grâce au site www.airqualitynow.eu.

Indices	Qualificatif de la qualité de l’air	PM_{10} (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) <i>Moyenne sur 8h</i>	SO_2 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) <i>Moyenne des maxima horaire</i>	NO_2 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) <i>Moyenne des maxima horaire</i>	O_3 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) <i>Moyenne des maxima horaire</i>
1	Très bon	0 – 9	0 – 39	0 – 29	0 – 29
2	Très bon	10 – 19	40 – 79	30 – 54	30 – 54
3	Bon	20 – 29	80 – 119	55 – 84	55 – 79
4	Bon	30 – 39	120 – 159	85 – 109	80 – 104
5	Moyen	40 – 49	160 – 199	110 – 134	105 – 129
6	Médiocre	50 – 64	200 – 249	135 – 164	130 – 149
7	Médiocre	65 – 79	250 – 299	165 – 199	150 – 179
8	Mauvais	80 – 99	300 – 399	200 – 274	180 – 249
9	Mauvais	100 – 124	400 – 599	275 – 399	250 – 359
10	Très mauvais	≥ 125	≥ 600	≥ 400	≥ 360

Tableau II.2: Indice ATMO ; source : Airparif

Indice	Grille	 INDICE TRAFIC							 INDICE DE FOND							
		Polluant obligatoire				Polluant supplémentaire			Polluant obligatoire				Polluant supplémentaire			
		NO2	PM10		PM2.5		CO	NO2	PM10		O3	PM2.5		CO	SO2	
			1h	24h	1h	24h			1h	24h		1h	24h			
Très élevé	>100	>400	>180	>100	>110	>60	>20000	>400	>180	>100	>240	>110	>60	>20000	>500	
Élevé	100	400	180	100	110	60	20000	400	180	100	240	110	60	20000	500	
	75	200	90	50	55	30	10000	200	90	50	180	55	30	10000	350	
Moyen	75	200	90	50	55	30	10000	200	90	50	180	55	30	10000	350	
	50	100	50	30	30	20	7500	100	50	30	120	30	20	7500	100	
Faible	50	100	50	30	30	20	7500	100	50	30	120	30	20	7500	100	
	25	50	25	15	15	10	5000	50	25	15	60	15	10	5000	50	
Très faible	25	50	25	15	15	10	5000	50	25	15	60	15	10	5000	50	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

- NO2, O3, SO2 : valeur horaire / maximum horaire en µg/m3
- PM10, PM2.5 : valeur horaire / maximum horaire ou moyenne journalière ajustée en µg/m3
- CO : moyenne glissante 8 heures / maximum de la moyenne glissante 8 heures en µg/m3

Tableau II.3: Indice européen Citeair ; source : Airparif

Les mesures directes de l'exposition à la pollution de l'air d'un individu ou d'un groupe d'individus sont complexes car elles demandent des moyens humains et matériels importants. De plus, les capteurs portatifs actifs sont imposants et ne mesurent souvent qu'un seul polluant, alors qu'un individu est exposé à plusieurs polluants en même temps. Les mesures avec des tubes passifs qui récoltent l'air durant un laps de temps puis sont analysés en laboratoire ne permettent pas de savoir à quels polluants précisément un individu est exposé lors de chacune de ses activités. Actuellement, la pollution de l'air est estimée sur l'ensemble d'une population régionale grâce aux réseaux de stations de mesure automatique, et complétées par des modèles qui permettent d'évaluer et de prévoir les niveaux régionaux de polluants. Les campagnes de mesure à des échelles régionale et locale aident à améliorer les connaissances sur la variabilité spatiale et temporelle de la pollution de l'air, et ainsi d'estimer les environnements et les heures où un individu peut être le plus exposé à un ou plusieurs polluants. Ce sont des mesures et évaluations objectives de la pollution de l'air. L'individu peut percevoir sa propre exposition à travers une mesure personnelle subjective.



Chapitre III

La perception de la pollution de l'air extérieur

La perception de la pollution est de l'ordre du sensible. Elle dépend à la fois de la perception sensorielle, produite par la mobilisation des sens sur l'observation à court terme, et de la représentation cognitive, faite par l'apprentissage et la connaissance rationnelle (Annesi-Maesano, 2007 ; Harpet, 2010). Sa mesure subjective se fait à l'aide d'enquêtes qualitatives ou quantitatives. Elle est complexe car elle varie d'un individu à l'autre selon ses capteurs sensoriels et sa connaissance de la pollution de l'air. Ce chapitre présente les facteurs de la perception sensorielle et de la représentation cognitive.

III.1. La perception sensorielle de la pollution de l'air

La pollution atmosphérique peut être perçue physiquement (picotements des yeux, difficultés respiratoires, *etc.*) ou par les sens, tels que la vue et l'odorat (bien qu'elle soit souvent inodore). Cette perception est une expérience sensible du réel, relative à l'exposition objective des individus. Indirectement, la pollution atmosphérique peut aussi être liée à des représentations auditives ou olfactives.

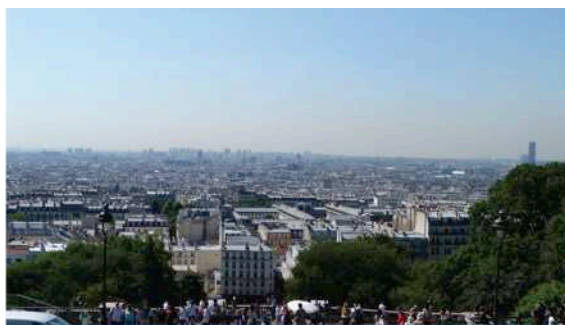
III.1.1. La perception visuelle

La pollution de l'air peut être visible particulièrement lors de smogs photochimiques et hivernaux. Le smog, de couleur brunâtre, est un mélange de polluants et de brouillard qui limite la visibilité dans l'atmosphère. Le smog photochimique apparaît au printemps et à l'été lors des épisodes de pollution à l'ozone. Les smogs hivernaux sont dus aux particules.

La figure III.1 montre des photographies de vues sur Paris prises du Sacré-Cœur et du parc de Belleville dans le 20^{ème} arrondissement parisien avec une qualité de l'air différente pour chaque jour. La photographie A est prise le 25 juillet 2012 durant un épisode de pollution à l'O₃. Une couche de pollution est visible sur la photographie. L'O₃ est incolore. Le mélange de fines gouttelettes d'eau, de particules et de NO₂ avec le rayonnement solaire donne cette couleur. Le

NO₂ a une couleur brunâtre (fig. III.1 D). Les aérosols affectent la visibilité à cause de la réflexion du rayonnement solaire sur les particules ou par son absorption (Brignon, 2003 ; Ebner *et al.*, 2005). De plus, les particules peuvent être des noyaux de condensation accentuant le phénomène de brouillard lors de pics de pollution. Sur la photographie E prise du parc de Belleville lors d'un épisode de pollution aux particules, la visibilité est très faible avec un niveau d'humidité très élevé ce jour-là (80% mesuré à 12h par la station Météo-France Paris-Montsouris). Quelques études ont mesuré la visibilité dégradée par la pollution de l'air et particulièrement l'impact des particules et des conditions météorologiques dans plusieurs villes (Doyle et Dorling, 2002 ; Marquez *et al.*, 2005 ; Yang *et al.*, 2007).

Cette visibilité dégradée peut être perçue par la population et par les touristes particulièrement lorsqu'ils sont sur des sites avec vue telle que du Sacré-Cœur ou du haut de la Tour Eiffel. Néanmoins, ils peuvent percevoir une visibilité dégradée comme une gêne mais ne pas savoir qu'elle est due à la pollution atmosphérique et ne pas en déduire qu'ils sont plus fortement exposés à la pollution les jours de smog. Selon leur provenance, les touristes sont plus ou moins sensibilisés à la pollution de l'air visible. Ce type de problématique est fortement pris en compte aux États-Unis par exemple (Hyslop, 2009). Plusieurs localités urbaines et rurales aux États-Unis ont installé des appareils photo numériques qui prennent des images en continu (de l'ordre de quelques secondes souvent) et les envoient directement sur internet, visibles par le grand public, avec un bulletin de qualité de l'air et/ou les niveaux de pollution sont indiqués à côté des images (<http://www.airnow.gov/> ; <http://www.hazecam.net/>). La figure III.2 présente des impressions écrans du site Puget Sound Clean Air Agency (<http://www.pscleanair.org/>) sur lesquelles des photographies prises par webcam de Seattle sont disponibles avec comme informations, la distance de la visibilité horizontale, les niveaux journaliers de PM2.5 (moyenne sur 24h) et l'indice AQI. Le calcul de la visibilité se fait avec un transmissiomètre. Il mesure la visibilité en enregistrant l'atténuation d'un faisceau de lumière traversant un fluide sur une certaine distance. L'indice AQI (Air quality index) est l'indice de qualité de l'air américain. Il va de 0 à 500 avec le même principe que l'indice ATMO ou Citeair (<http://www.airnow.gov/>). Les touristes ont aussi accès à une information sur la visibilité sur les sites touristiques. Les espaces naturels américains comme le Yosemite ou le Grand Canyon disposent de webcams photographiant la visibilité. Avant de monter en haut de l'Empire State Building à New-York, il est possible d'appeler un numéro afin de connaître la visibilité (<http://www.esbnyc.com/>). Les américains sont donc très sensibilisés à la perception visuelle de la pollution atmosphérique. Ils peuvent peut-être plus facilement l'appréhender à Paris que des touristes qui ne sont pas informés.



A - 25 juillet 2012 à 15h

Indice Citeair : 80/100 dû à l'O₃

Taux d'O₃ horaire mesurés à la station de fond urbaine Paris 18^{ème} d'Airparif = 162 µg/m³



B - 3 mars 2013 à 15h

Indice Citeair : 80/100 dû aux PM₁₀

Taux de PM₁₀ horaire mesurés à la station de fond urbaine Paris 18^{ème} d'Airparif = 57 µg/m³



C - 9 mars 2013 à 15h

Indice Citeair : 55/100 dû aux PM₁₀

Taux de PM₁₀ horaire mesurés à la station de fond urbaine Paris 18^{ème} d'Airparif = 14 µg/m³



D - 22 septembre 2010 à 12h

Indice Atmo : 6/10 dû au NO₂

Taux de NO₂ horaire mesurés à la station de fond urbaine Paris 18^{ème} d'Airparif = 139 µg/m³



E - 31 janvier 2011 à 12h

Indice Atmo : 8/10 dû aux PM₁₀

Taux de PM₁₀ horaire mesurés à la station de fond urbaine Paris 18^{ème} d'Airparif = 73 µg/m³

L'association Airparif a utilisé l'indice de qualité de l'air Atmo jusqu'à fin 2011 et est passée à l'indice européen Citeair depuis 2012.

Figure III.1 : Photographies prises des marches du Sacré-Cœur (A, B et C) et du parc de Belleville (D et E) avec une vue sur Paris



Figure III.2 : Photographies prises par une webcam à Seattle pour visualiser la qualité de l'air avec la distance de la visibilité, les niveaux de PM_{2,5} sur 24h et l'indice de qualité de l'air AQI ; *source : <http://www.pscleanair.org/airq/visibility/default.aspx>*

Lors des épisodes de pollution, les panneaux d'affichage de la mairie de Paris indiquent que les niveaux de pollution de l'air sont élevés et les précautions à prendre dans le but d'informer la population locale (fig. III.3). La qualité de l'air est visible sur ce panneau lors des journées polluées, mais il faut être sensibilisé à la question de la pollution de l'air pour faire attention au panneau, appréhender la signification du message et agir en conséquence.

Par ailleurs, les particules solides dégradent le patrimoine bâti en s'accumulant sur la surface. Les façades des bâtiments ou statues en milieu urbain ont souvent des zones claires et des zones

plus foncées. Les endroits clairs sont souvent soumis aux pluies et entraînent le lessivage des particules, voire l'érosion par dissolution. Les zones les plus sombres sont une accumulation de poussières (Ebner *et al.*, 2005). Cette pollution est visible par les touristes. Cependant, les bâtiments touristiques parisiens sont fréquemment rénovés.



Figure III.3 : Panneaux d'information de la mairie de Paris avec les informations sur les mesures à prendre lors d'épisodes de pollution, photographies prises le 25 juillet 2012 lors d'un épisode de pollution à l'ozone.

La vue du trafic routier peut faire penser à la pollution atmosphérique (Bickerstaff et Walker, 2001). Les fumées de chauffage ou d'usines sont aussi souvent associées à la pollution de l'air. En 2008, l'INPES (Institut national de prévention et d'éducation pour la santé) a publié les résultats d'un sondage téléphonique auprès d'environ 2000 français (de 18 à 75 ans) sur la perception des risques liés à l'environnement (pollution des sols, de l'air, des eaux, intoxications au monoxyde de carbone, légionnelles, bruit et téléphonie mobile ; Menard *et al.*, 2008). 61,6 %

des personnes interrogées associent fumées et pollution, et 52,0 % établissent un lien entre mauvaises odeurs et pollution.

III.1.2. La perception olfactive

La pollution de l’air a longtemps été assimilée à des odeurs désagréables et un air putride, vecteurs de maladies (Roussel, 2007). C’est à la fin du XIX^{ème} siècle avec les découvertes de Pasteur que l’air invisible et inodore a aussi été perçu comme dangereux pour la santé. Cependant, certaines odeurs sont encore perçues comme de la pollution de l’air.

La perception olfactive de la pollution de l’air est complexe, d’une part, parce que la plupart des polluants sont inodores, et d’autre part, parce qu’elle dépend aussi de la dimension cognitive de chaque individu. En effet, l’odeur est souvent reliée à une relation affective, rarement neutre. Son souvenir est prégnant et son pouvoir d’évocation multi-sensoriel. Elle peut être reliée à des représentations visuelles, sonores et tactiles.

Une même odeur peut être interprétée différemment suivant le contexte. Par exemple, à la campagne, le passage d’une voiture et l’odeur des gaz de pot d’échappement seront perçus comme négatives car il trouble l’instant de bien être (ADEME, 2008). Elle évoque la pollution. En ville, le passage d’une voiture étant plus habituel, l’odeur des pots d’échappement est moins remarquée. Les touristes peu habitués à la ville et à la densité de trafic routier peuvent cependant se sentir gênés et ressentir la pollution de l’air à proximité des voitures.

Lucile Grésillon a montré dans sa thèse intitulée « *Sentir Paris : Bien-être et valeur des lieux* » la complexité de la perception des odeurs (Grésillon, 2010). Les odeurs de la pollution de l’air sont évoquées en relation avec les « gaz des pots d’échappement », les « voitures ». La présidente du quartier des Peupliers dans le 13^{ème} arrondissement parisien, interrogée au cours d’un entretien sur les odeurs et les nuisances du quartier, dit percevoir la pollution de l’air par l’odeur des pots d’échappement. Le trafic routier est visible, associé à des odeurs et peut-être une nuisance sonore reliée à la pollution de l’air.

III.1.3. Les nuisances sonores

Le bruit du trafic routier et sa présence peuvent être assimilés à une mauvaise qualité de l’air. Dans un espace urbain, les principales nuisances environnementales ressenties sont le bruit et la pollution atmosphérique (Dab et Roussel, 2001). Des enquêtes ont été réalisées durant l’été 2008 sur le campus universitaire de San Diego à proximité de travaux et du trafic routier pour connaître la perception de l’exposition individuelle à la pollution de l’air (Nikolopoulou *et al.*, 2011). Les résultats de la perception de chaque individu ont été corrélés aux concentrations de PM10, au niveau sonore et à des données météorologiques (température, humidité et vitesse du vent). Les proximités du trafic routier et du chantier de construction sont perçues comme des

sources de nuisances sonores et de pollution, et en lien, pour la majorité des enquêtés. Nous noterons, par ailleurs, qu'aucune relation significative n'a été trouvée entre les conditions météorologiques et la perception de la pollution atmosphérique.

Depuis la Directive Européenne 2002/49/CE, des cartes de « bruit » doivent être produites pour les agglomérations supérieures à 250 000 habitants et le long des axes routiers. En Île-de-France, les villes et les collectivités territoriales de la région créent ces cartes avec l'aide de l'association Bruitparif, créée en 2004 à l'initiative du Conseil régional d'Île-de-France et à la demande des associations de défense de l'environnement (<http://www.bruitparif.fr/>). Des cartes de bruit routier à Paris ont été élaborées par les services de la mairie à partir de la densité du trafic routier dans chaque rue. Plusieurs cartes ont été réalisées selon différentes périodes de la journée : le jour (de 6h à 18h), en soirée (18h à 22h) et la nuit (de 22h à 6h ; <http://www.paris.fr>). Ces cartographies sont essentiellement basées sur le trafic routier. Le niveau sonore est le plus élevé à proximité de la circulation routière et sur les grands axes.

La perception sonore et la perception de la pollution de l'air peuvent être liées à proximité du trafic routier, principal émetteur de NO₂ et second de particules. Cependant ces perceptions vont varier d'un individu à l'autre selon ses connaissances sur le sujet.

III.2. La cognition et la représentation de la pollution de l'air

La perception sensible de la pollution de l'air va dépendre de la représentation cognitive que chaque individu en a. Cette représentation va varier selon les connaissances de l'individu sur le sujet par son éducation, son accès à l'information et la médiatisation. Ces paramètres vont dépendre pour tous les touristes de critères socio-économiques mais aussi de leur sensibilisation à la problématique de la pollution de l'air dans leur pays d'origine.

III.2.1. Informations et médiatisation sur la qualité de l'air

Les questions environnementales sont très médiatisées depuis une dizaine d'années dans les pays occidentaux à travers les médias et des films catastrophistes, particulièrement avec la question du changement climatique. Le public dans les pays occidentaux est de plus en plus sensibilisé à l'environnement et au développement durable.

La figure III.4 montre le nombre de documents obtenus par année, de 1990 à 2012, selon plusieurs requêtes sur le changement climatique, la pollution de l'air et les particules, issues de la base de données Factiva. C'est un site regroupant plus de 10 000 sources de 152 pays (journaux, magazines, agences de presse, programmes média, rapports de sociétés, images). Nous avons interrogé la base de données avec une recherche sur le terme « climate change », trois recherches sur la pollution de l'air en anglais « air pollution », en allemand « luftverschmutzung » et en espagnol « contaminación del aire », et deux recherches sur les

« PM10 » et les « PM2.5 ». Nous avons aussi fait des requêtes sur le terme « ozone » et sur le terme « « nitrogen dioxide » (NO_2). Les recherches sur l’« ozone » donnaient en grande majorité des résultats sur l’ozone stratosphérique. Les recherches plus précises sur « tropospheric ozone » ne donnaient qu’une quarantaine de résultats, tout comme pour les recherches sur le terme « nitrogen dioxide ».

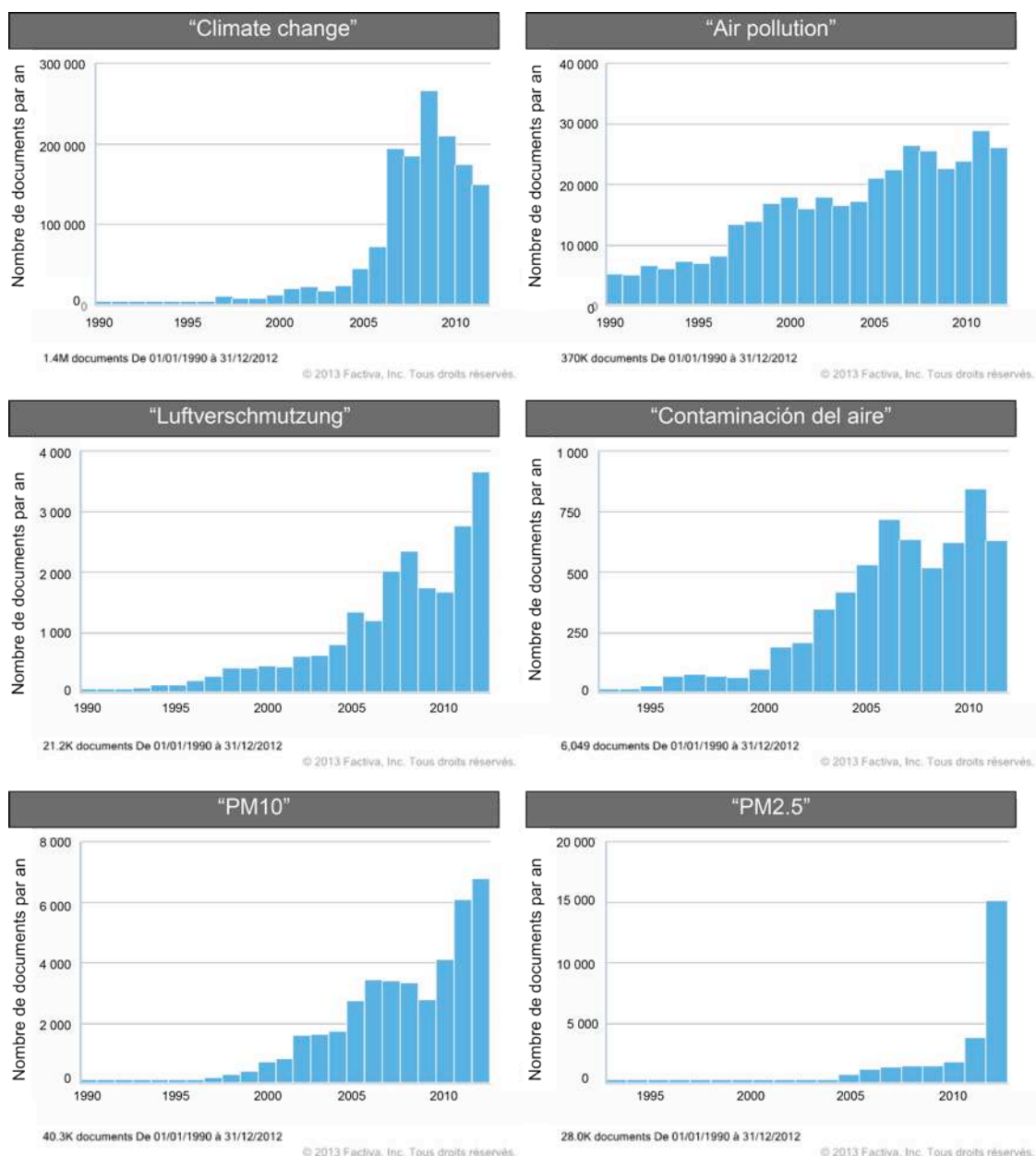


Figure III.4 : Nombre de documents par année et par mots clés de recherche ; *source :* <https://global.factiva.com>

Pour toutes les recherches, le nombre de documents est plus important depuis les années 2000 car les journaux en ligne sont plus nombreux depuis une dizaine d’années et la base de données a été créée en 1999. Le résultat des requêtes montre que la pollution de l’air est traitée dans les journaux internationaux avec une tendance plutôt à la hausse depuis les années 2000. Elle est

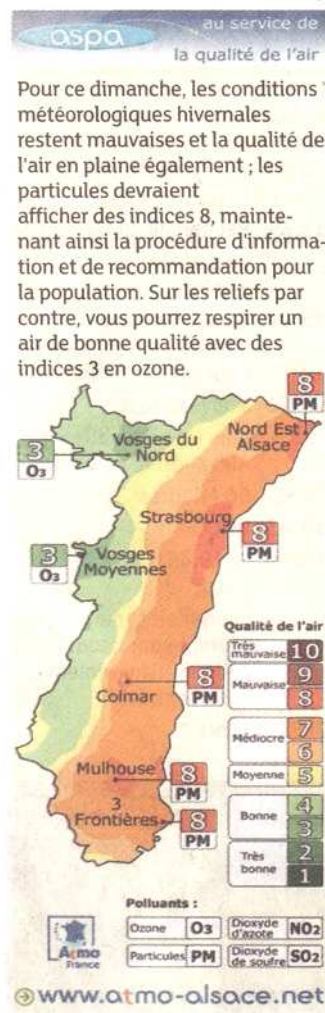
cependant beaucoup moins traitée que le changement climatique qui a connu un accroissement médiatique très fort à partir de 2007 et un pic en 2009 avec le sommet de Copenhague. La sensibilisation au changement climatique semble plus importante que celle sur la pollution de l'air. Par ailleurs, nous noterons que les informations sur les particules connaissent un pic dans les médias ces dernières années. La pollution de l'air est donc médiatisée dans les journaux. Son traitement et la sensibilisation peuvent être différents selon les pays.

La qualité de l'air est traitée dans les médias sous plusieurs formes : quotidiennement avec les bulletins de qualité de l'air et épisodiquement lors des pics de pollution régionaux ou nationaux, lors des nouvelles réglementations ou de mesures prises pour améliorer la qualité de l'air, et par la médiatisation de la pollution de l'air dans d'autres pays.

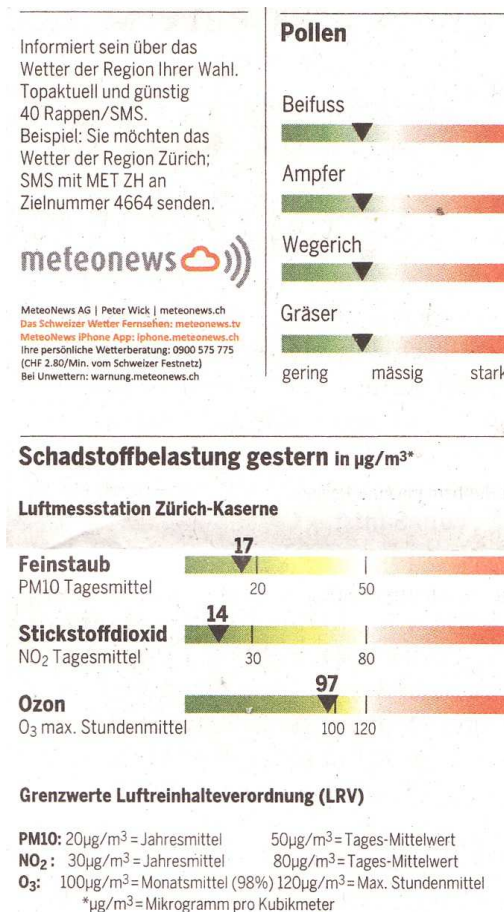
La pollution de l'air est médiatisée dans beaucoup de pays européens avec la diffusion quotidienne des indices de qualité de l'air tels que l'indice AQI aux Etats-Unis, IMECA au Mexique (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire), l'indice ICA (Common Air Quality Index) en Europe ou encore l'indice ATMO en France (<http://airnow.gov/> ; <http://www.airqualitynow.eu/> ; <http://www.buldair.org>). La figure III.5 présente en exemple les bulletins de qualité de l'air pour l'Alsace (issu du journal *Dernières Nouvelles d'Alsace*) et pour Zurich (issu du journal *Tagesanzeiger*). Ces indices sont montrés dans les journaux, lors de bulletins à la télévision ou visibles sur le site internet des villes ou de l'association qui surveille la qualité de l'air. Tous les pays et les régions ne disposent pas de cet indice, ou bien, il existe mais n'est pas visible du grand public.

En région parisienne, une des questions d'un sondage fait par l'institut Ipsos auprès de 500 franciliens sur l'image de l'association Airparif portait sur la connaissance de l'indice ATMO. 78% des franciliens disent avoir connaissance de cet indice (Ipsos, 2008). Une enquête réalisée auprès de Strasbourgeois en 2007 indique que l'indice ATMO est majoritairement reconnu par le public voire même familier (Waldvogel *et al.*, 2008 ; Glatron, 2009). Lors de cette enquête, une carte de la qualité de l'air avec la répartition des indices ATMO en Alsace, du même type que la figure III.5 A, est montrée aux enquêtés. Elle date d'un jour estival avec un indice ATMO dû à l'ozone et elle indique une qualité de l'air plutôt bonne dans les villes (indice 4) et moyenne en zone rurale (indice 5). La plupart des enquêtés ne comprennent pas que la qualité de l'air soit meilleur en ville qu'à la campagne. Ce n'est pas compatible avec le sens commun et l'idée que l'air est pur à la campagne. En effet, selon le baromètre santé environnement de 2007, 62,8 % des personnes interrogées pensent que l'air est pur à la campagne (Menard *et al.*, 2008). Les personnes avec un niveau d'études supérieur interprète plus facilement la carte. L'indice de qualité de l'air permet donc de répondre à une préoccupation sociale en informant et sensibilisant sur la qualité de l'air. Chaque individu peut prendre conscience de la variabilité spatiale et temporelle de la pollution de l'air, et de sa propre exposition suivant les jours et les

lieux où il se situe. Cependant, son interprétation est difficile sans apprentissage sur le sujet, dépendant de leur niveau d'éducation, de leur niveau socio-économique et de leur exposition personnelle quotidienne.



A – DNA, 7 février 2012



B – Tagesanzeiger, 25 août 2012

Figure III.5 : Bulletins de qualité de l'air en Alsace publié dans les *DNA* et à Zurich publié dans le *Tagesanzeiger*

La pollution de l'air est aussi régulièrement médiatisée à travers les nouvelles réglementations et mesures prises pour la limiter. Par exemple, la mise en place de zones d'actions prioritaires pour l'air (ZAPA), une des dispositions de la loi Grenelle II (loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010) a été fortement médiatisée depuis 2010, avec une forte comparaison de ce qui était fait dans les autres pays européens (Rousset, 2011 ; Patriarca, 2012). Les bilans de qualité de l'air annuels faits par les associations de surveillance de qualité de l'air ASQAA donnent aussi lieu à des articles. Enfin, ponctuellement, les épisodes de pollution sont aussi médiatisés par les quotidiens nationaux et régionaux. Par exemple, le journal *Le Monde* a publié un article le 10 février 2012 intitulé « Froid : la pollution aux particules atteint un seuil d'alerte dans plusieurs villes »

traitant d'un épisode de pollution aux particules qui a eu lieu en France, dans l'Ouest, le Nord et l'Alsace, en France. Plusieurs quotidiens régionaux ont aussi traité de cet épisode de pollution (La Voix du Nord, 2012 ; Le Parisien, 2012 ; Ouest France, 2012). Cette médiatisation aide à la prise de conscience de la pollution atmosphérique sur son lieu de vie et dans son pays.

Outre les épisodes nationaux de pollution de l'air, des articles sont fréquents sur la pollution de l'air dans d'autres pays. La pollution en Chine est depuis une dizaine d'années très médiatisée au niveau international, particulièrement avant les jeux Olympiques en 2008, où les niveaux de pollution devaient être réduits. Un épisode de pollution très médiatisé a atteint des records en janvier 2013 à Pékin puis à Shanghai. Il a été très médiatisé au niveau international. Les deux photographies de la figure III.6 issues du site internet BBC News illustrent l'épisode de pollution aux particules. Elles donnent une représentation extrême d'un épisode de pollution, de son éventuel impact sanitaire, avec les chinois portant des masques et une visibilité très réduite. La médiatisation internationale des importants épisodes de pollution sensibilise à la pollution de l'air. Cependant, la perception de pollution de l'air passe avant tout par son expérience personnelle.



Figure III.6 : Photographies sur la pollution de l'air à Pékin le 13 janvier 2013 sur le site de la BBC News, source : <http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-21005228>

III.2.2. Expérience personnelle de la qualité de l'air

La représentation cognitive dépend de sa propre expérience selon son exposition sur son lieu de vie et les effets sur sa santé (asthme, gêne oculaire... ; Nikolopoulou *et al.*, 2011). L'expérience physique de la pollution de l'air permet d'avoir des repères sanitaires et sensoriels.

La plupart des études portant sur la perception de la pollution de l'air ont été réalisées en enquêtant auprès de la population locale sur son lieu d'habitation ou son lieu de travail (Bickersta et Walker, 2001 ; Frere *et al.*, 2005 ; Jacquemin *et al.*, 2007 ; MacKerron et Mourato, 2009). Les habitants se sentent d'autant plus touchés qu'ils estiment que la pollution de l'air diminue leur qualité de vie. Cette vision varie selon le lieu de vie et l'environnement. Pour les populations locales interrogées, il existe des enjeux de pollution atmosphérique.

Une enquête réalisée en 2003 par l'Institut français de l'environnement (IFEN) montre que plus l'espace géographique est vaste et éloigné du lieu de résidence, plus l'état de l'environnement est jugé comme mauvais : 15% des enquêtés jugent "mauvais" (voire "très mauvais") l'état de l'environnement dans leur région, 19% ont la même opinion pour la France, 20%, pour la communauté européenne et 63% pour ce qui concerne le monde (Ifen, 2003).

III.2.3. Vision de la société holistique et de la société analytique

La perception de la pollution de l'air dépend aussi de nos représentations symboliques et sociales. Ainsi, il va être différent selon les sociétés plutôt collectivistes, avec un mode de pensée considérée comme holistique, et les sociétés plutôt individualistes, avec un mode de pensée plutôt analytique (George, 1971 ; Lammel, 2007).

La pensée holistique, traditionnellement le modèle chinois, considère chaque objet comme faisant partie d'un ensemble. Ces caractéristiques peuvent être connues en appréhendant l'ensemble du contexte et des relations de l'objet. L'apprentissage et la connaissance sont obtenus par l'expérience et transmis oralement d'un individu à l'autre. Les membres d'une communauté interagissent pour améliorer le bien-être de tous les individus, et gérer une nuisance. Ils sont plus mesurés et utilisent plus leur expérience sensible. Ils cherchent une solution intermédiaire entre deux propositions opposées.

Dans les sociétés individualistes, historiquement le modèle grec mais représenté de nos jours par la société américaine, les intérêts de chaque individu priment avant ceux des autres. La compréhension d'un objet se focalise sur ses caractéristiques propres. Les connaissances et les représentations de chaque individu sont basées sur la logique, en évitant les contradictions. Ainsi, les mesures objectives de la pollution de l'air vont être privilégiées pour appréhender la pollution de l'air. Ils se baseront donc sur leurs connaissances rationnelles pour percevoir la qualité de l'air.

Une société plutôt holistique (en Asie et en Afrique) et une société plutôt analytique ont une représentation du monde différente influant sur leur représentation de la pollution de l'air.

La perception de la pollution de l'air est difficile à mesurer et pour en tirer des généralités car elle est très variable d'un individu à l'autre selon son expérience sensorielle et sa représentation de la pollution de l'air, dépendant de ses connaissances et son apprentissage. Elle est d'autant plus complexe avec les touristes comme sujet d'étude car leur pays de résidence, leur culture, leur lieu de vie, leur accès et leur éducation sur la question de la pollution de l'air sont très variables. Néanmoins, nous pouvons poser l'hypothèse que leur perception de la pollution de l'air varie selon leur origine.

Conclusion Partie I

La première partie présente les différents facteurs de variabilité de l'exposition et de la perception de la pollution de l'air à partir d'un état de l'art. Le schéma ci-dessous résume les étapes des émissions de polluants à leur perception et à leurs impacts sanitaires. Les polluants sont présents dans l'atmosphère suite à leur émission puis dispersés, transportés et transformés selon l'influence des conditions météorologiques. Selon leur concentration dans l'air, ils auront éventuellement des impacts sur la santé de chaque individu exposé et sur sa perception de la pollution, selon des ressentis physiques et sensoriels ou des représentations cognitives propres à chacun.

Cet état de l'art nous a permis d'orienter nos choix méthodologiques sur les périodes et les lieux où les touristes sont exposés à la pollution de l'air.

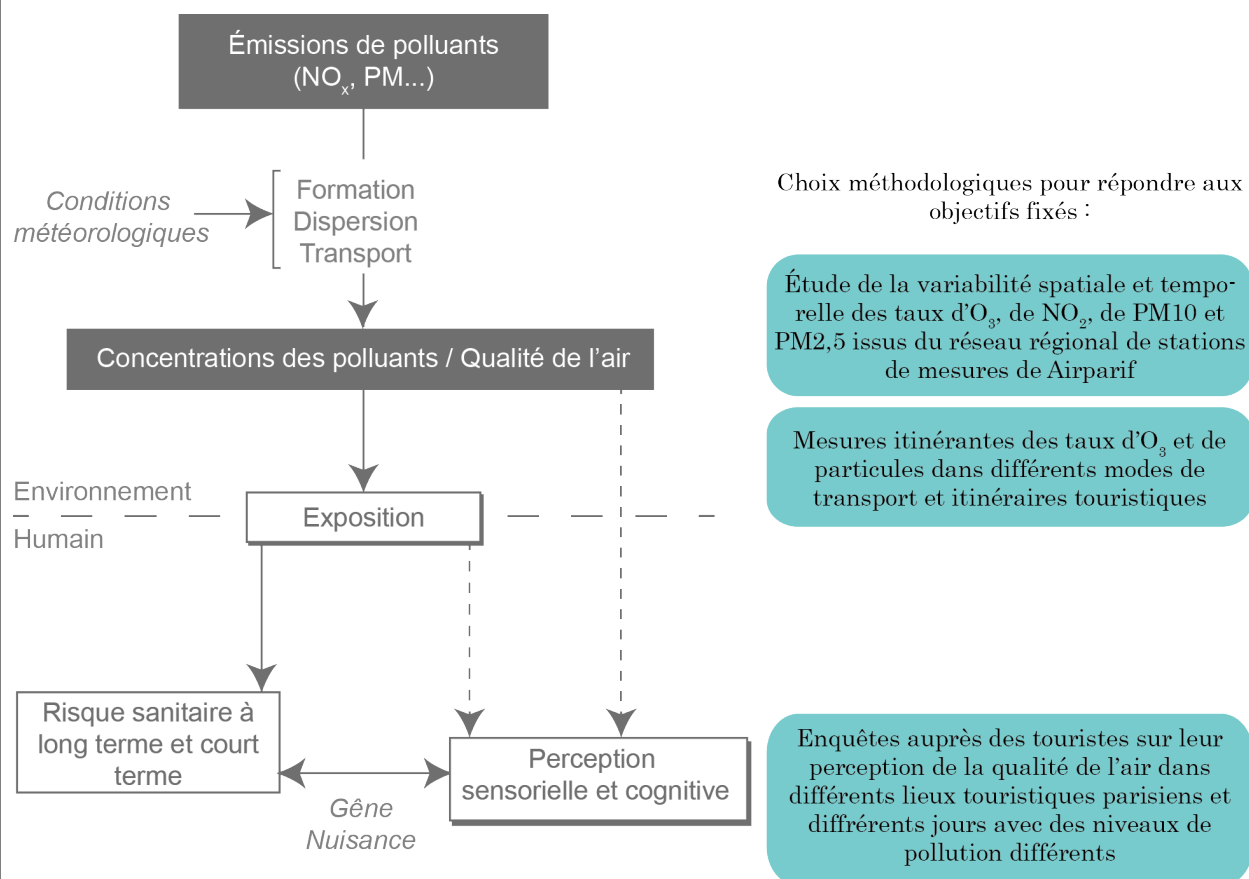


Schéma résumant les étapes de l'exposition à la perception individuelle de la pollution de l'air

Partie II

Variabilité spatiale et temporelle de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules en région parisienne



La deuxième partie dresse le contexte régional de la pollution de l'air en Île-de-France, en présentant les variations temporelle et spatiale de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules.

Le premier chapitre de cette partie présente les données de taux d'ozone, de particules et de dioxyde d'azote issues du réseau de stations de mesure automatique de l'association Airparif, ainsi que les données météorologiques utilisées. Il décrit ensuite brièvement les méthodes statistiques employées.

Le second chapitre expose les variations des polluants à plusieurs échelles (interannuelle, annuelle, hebdomadaire et journalière) et les met en relation avec les conditions météorologiques et d'émission. La variabilité spatiale est étudiée à l'échelle régionale en analysant les différences entre les types de stations (trafic, urbaine, périurbaine, rurale) et les variations selon le sens du vent.

Le dernier chapitre focalise sur les épisodes de pollution afin d'évaluer et de présenter les situations pendant lesquelles les touristes ont le plus de risques d'être exposés à la pollution de l'air extérieur.



Chapitre IV

Réseaux de mesures en région parisienne et approche méthodologique

L'Île-de-France dispose d'un réseau de stations de mesure réparties dans toute la région appartenant à l'association Airparif, qui permet d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des concentrations d'O₃, de NO₂, de PM₁₀ et de PM_{2,5} à l'échelle régionale. Ce chapitre présente le réseau de mesures, les données qui en sont issues et les données météorologiques utilisées pour étudier la pollution de l'air en région parisienne. Les données météorologiques sont des paramètres météorologiques issus de stations Météo-France, des bulletins météorologiques de Météo-France, du radiosondage de Trappes et des rétrotrajectoires de masses d'air de la NOAA. L'approche méthodologique, utilisée à l'échelle régionale, est construite à partir de statistiques descriptives pour caractériser les tendances, les cycles temporels, les variations spatiales et les épisodes de pollution des taux de concentrations d'O₃, de NO₂, de PM₁₀ et de PM_{2,5}.

IV.1. Les stations automatiques de mesures de la pollution de l'air du réseau Airparif et les données utilisées

Les données que nous avons utilisées pour étudier la variabilité spatiale et temporelle des concentrations d'O₃, PM et NO₂, sont issues du réseau automatique de l'association Airparif.

IV.1.1. Le réseau Airparif

Créée en 1979, l'association Airparif, agréée pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA), est chargée de surveiller la qualité de l'air sur l'ensemble de la région Île-de-France (<http://www.airparif.asso.fr>). Elle dispose d'un réseau de 65 stations réparties sur un rayon de 100 km autour de Paris: 51 stations automatiques permanentes et 14 stations temporaires à proximité du trafic. Elles ont pour but de mesurer la qualité de l'air et d'être représentatives de l'exposition de la population francilienne à la pollution de l'air. L'association dispose aussi de stations mobiles pour des mesures plus ponctuelles.

IV.1.2. Les types de stations de mesure

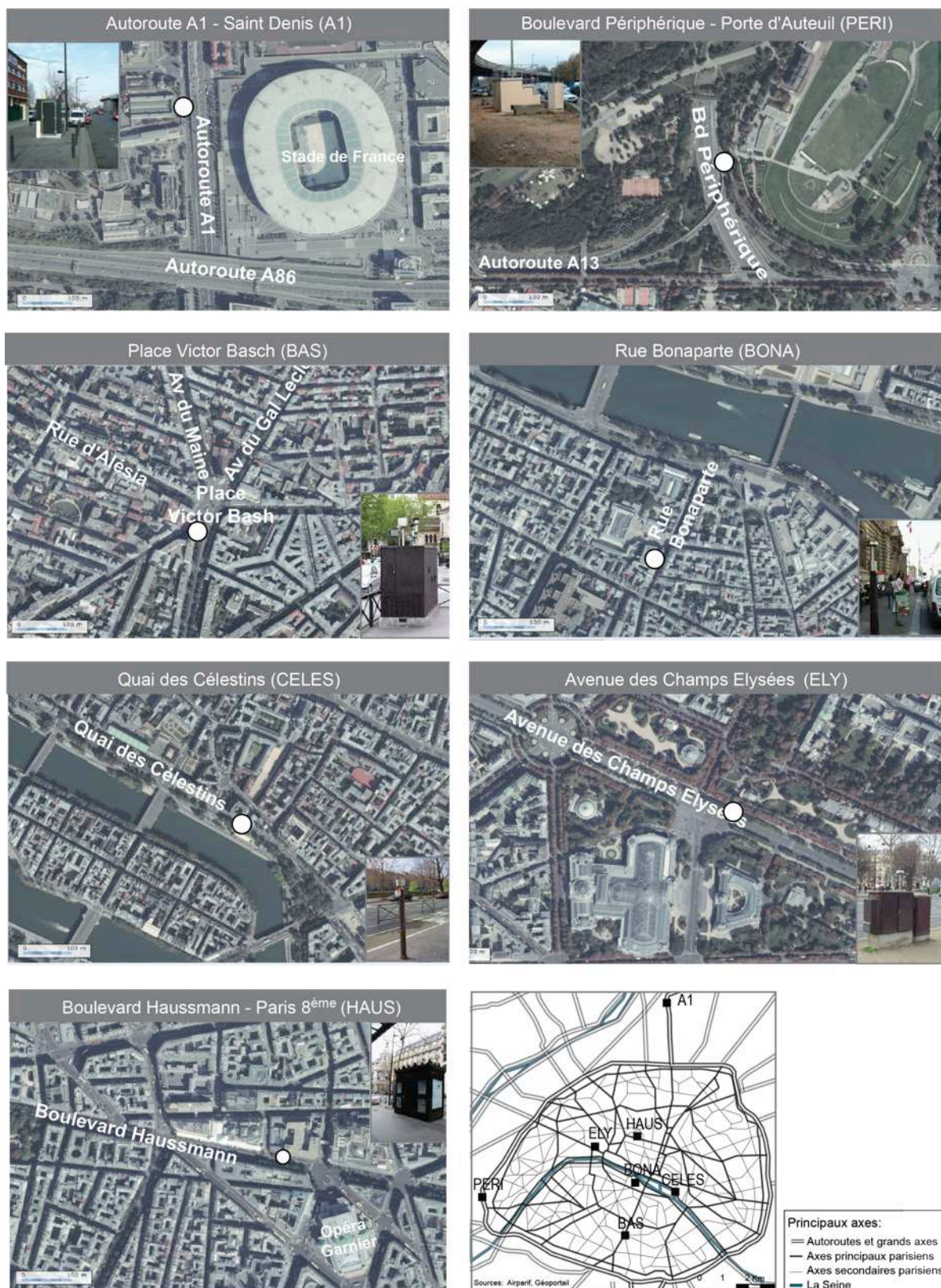
Comme il est vu dans le chapitre II, l'emplacement des stations automatiques permanentes du réseau Airparif est réglementé au niveau européen et national. En Île-de-France, elles sont classées en trois grands types de stations : les stations à proximité du trafic, les stations de fond et la station d'observation, présentées (www.airparif.asso.fr; ADEME, 2002).

Les stations trafic

Les stations dites *trafic* sont situées à proximité du trafic routier, à deux ou trois mètres en moyenne des pots d'échappement : là où la population est la plus exposée à la pollution d'origine automobile (ADEME, 2002). La figure IV.1 présente la situation de chaque station trafic appartenant au réseau Airparif et utilisée dans les chapitres V et VI. Ces stations trafic sont principalement situées dans Paris ou dans sa proche banlieue.

Les stations sont situées dans des environnements non similaires, ce qui peut influencer sur la variabilité spatiale et temporelle des polluants mesurés. La station du boulevard périphérique située Porte d'Auteuil (PERI) et celle située sur l'autoroute A1 à Saint-Denis (A1) sont proches de grands axes routiers avec une forte densité de véhicules y passant chaque jour. La station située place Victor Basch (BAS) dans le 14^{ème} arrondissement parisien est au croisement de plusieurs grandes avenues parisiennes. Sa situation d'intersection peut empêcher la dispersion de la pollution (Vardoulakis *et al.*, 2005 ; Yassin *et al.*, 2008 ; Soulhac *et al.*, 2009). Il en est de même pour les stations situées dans des rues canyon telle que celle de la rue Bonaparte (BONA) dans le 6^{ème} arrondissement parisien ou celle sur le boulevard Haussmann dans le 9^{ème} arrondissement (Vardoulakis *et al.*, 2002 ; Vardoulakis *et al.*, 2003). A l'inverse, les stations situées sur de larges axes comme celle située sur l'avenue des Champs Élysées dans le 8^{ème} arrondissement ou celle située sur les quais de Seine, au niveau du quai Célestin dans le 4^{ème} arrondissement ont des situations plus favorables pour la dispersion des polluants malgré un trafic routier journalier assez dense. La densité du trafic routier et la morphologie urbaine à côté des stations trafic sont donc différentes et peuvent donc influencer les concentrations.

Les concentrations de NO₂ et de PM₁₀ sont mesurées dans quasiment toutes les stations trafic mais les données ne sont pas forcément exploitables en raison de lacunes et de données invalidées par Airparif. Les PM_{2,5} sont mesurés pour l'instant uniquement dans trois stations (celle de l'autoroute A1 - Saint-Denis, celle du boulevard périphérique Auteuil, et celle de la route nationale 6 – MELUN). Le nombre de stations mesurant les PM_{2,5} a augmenté dans l'agglomération parisienne depuis 2007. L'O₃ n'est pas mesuré dans les stations trafic car la circulation routière émet du NO qui détruit immédiatement l'O₃. Les taux d'O₃ sont donc nuls ou très faibles à proximité du trafic. L'O₃ est donc mesuré uniquement dans les stations dites de fond.



Les données des stations A1, PERI et BAS sont utilisées pour les concentrations de NO_2 et de PM_{10} de 2000 à 2012. La série de données journalières et horaires issues des stations BONA, CELES, ELY et HAUS a beaucoup de valeurs manquantes (>10%), elles sont uniquement utilisées pour étudier la variabilité spatiale entre les stations trafic de 2007 à 2012.

source des fonds de carte : Géoportail

source des photos : Airparif

Figure IV.1 : Situation et photographies des stations trafic appartenant au réseau Airparif

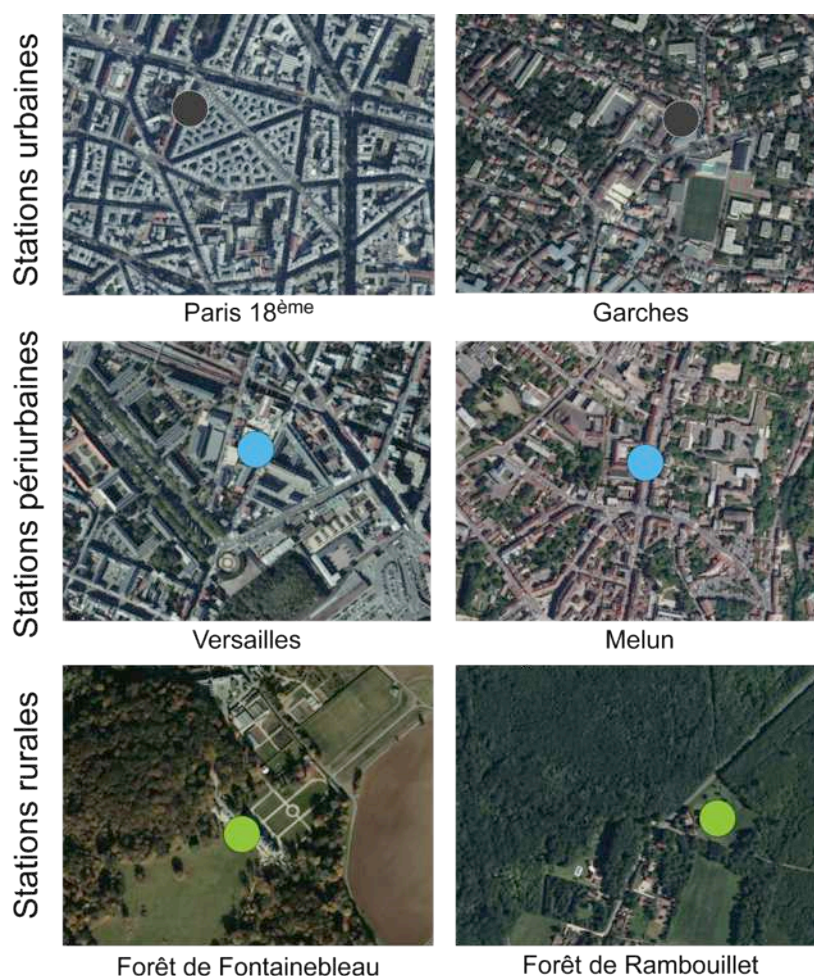


Figure IV.2 : Localisation de deux stations urbaines, deux stations périurbaines et deux stations rurales
sources : Airparif, Géoportail

Les stations de fond

Les stations de fond sont éloignées des sources d'émission (trafic routier et industrie) et mesurent le niveau ambiant de pollution de l'air du secteur géographique alentour. Parmi ces stations, trois types sont distingués :

- les stations dites *urbaines*, situées dans l'agglomération¹ parisienne avec un minimum de 4000 habitants dans un rayon de 1 km autour de la station ;
- les stations dites *périurbaines*, situées en périphérie de l'agglomération mais qui sont sous influence directe ;
- les stations dites *rurales régionales*, situées à plus de 50 km de l'agglomération, qui, permettent la surveillance de la qualité de l'air dans les zones rurales ainsi que l'étude des

¹ Selon la définition de l'INSEE, l'agglomération représente ici une unité urbaine d'un ensemble de communes présentant une zone de bâti continu (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions, avec au moins 2 000 habitants).

transferts régionaux de pollution (sous l'action du vent) et de la pollution photochimique (par exemple, l'ozone).

Le type de station de fond est donc surtout défini par la position par rapport à l'agglomération parisienne. Cependant, comme nous pouvons le voir sur la figure IV.2, l'environnement des stations peut-être différent pour une même classification de stations (ex : Paris 18^{ème} et Garches).

La figure IV.3 présente la localisation des stations de fond en Île-de-France utilisées de 2000 à 2012 pour les taux d'O₃ et de NO₂, et celles utilisées uniquement de 2007 à 2012 pour certaines stations mesurant les taux d'O₃, de NO₂ et de PM10. Les concentrations de PM2,5 ont, elles aussi, été étudiées grâce au réseau Airparif. Cependant, seulement deux stations de fond ont mesuré ces taux en continu depuis 2007 : Gennevilliers (GEN) et Vitry-sur-Seine (VIT).

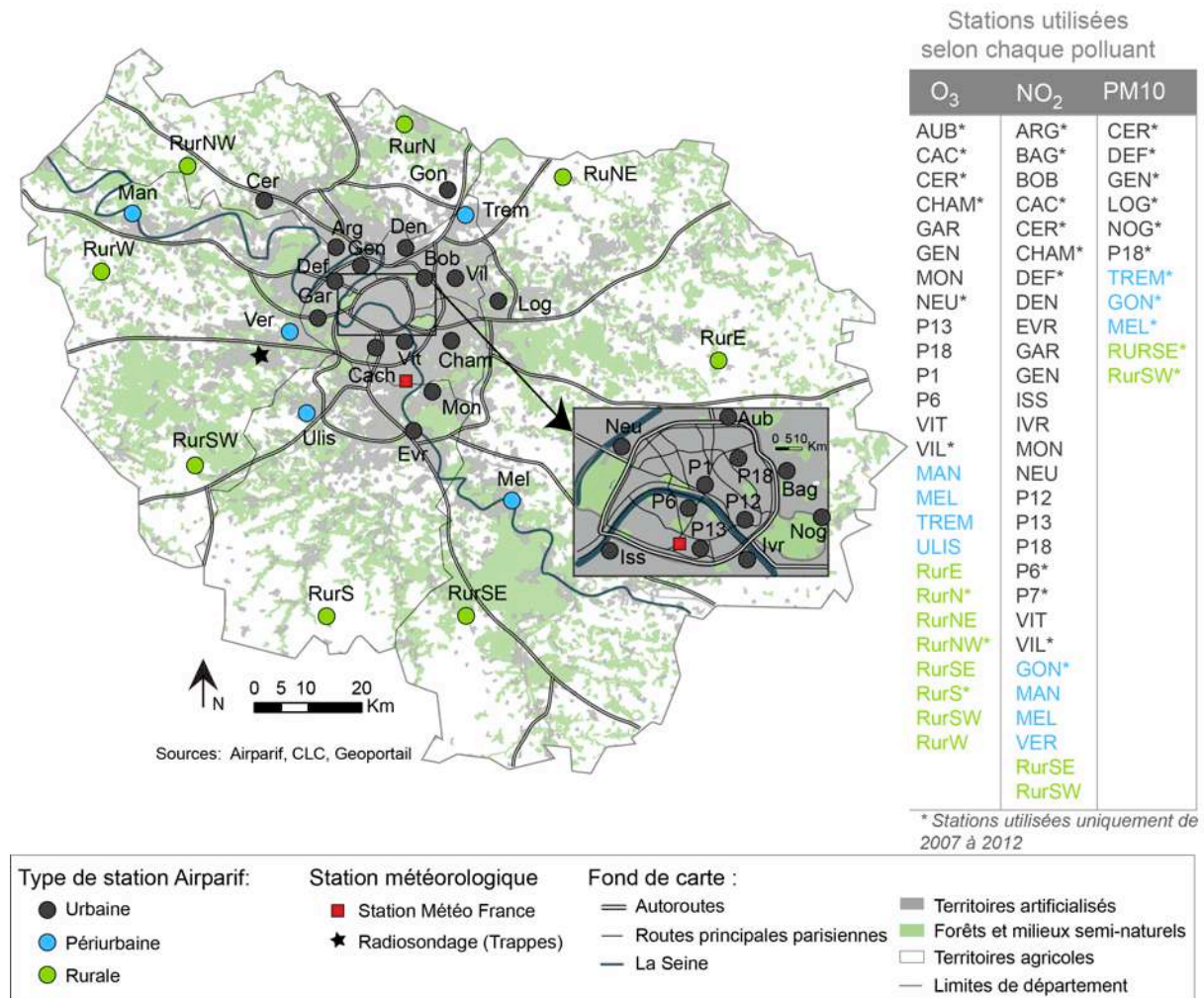


Figure IV.3 : Localisation des stations de fond (urbaine, périurbaine, rurale) appartenant au réseau Airparif, des stations Météo France et des radiosondages, utilisés dans cette thèse ; sources : Airparif, Géoportail

Les hauteurs de prélèvements des stations et leur altitude sont différents pour les stations de fond (tab. IV.1). La hauteur de prélèvement varie de 2,7 m à 21 m, et l'altitude, entre 29 m et 165 m, au dessus du niveau de la mer.

	Stations	Hauteur prélevement (m)	Altitude (m)
URBAINE	ARG	2,9	59
	AUB	4	46
	BOB	4	55
	CACH	4,4	63
	CER	8	94
	CHAM	4,3	71
	EVR	19,1	83
	GAR	3	133
	GEN	15,3	30
	ISS	4,3	34
	IVR	11	33
	DEF	2,7	44
	Mon	3,3	71
	NEU	2,6	36
	P7	4	33
	P6	12,6	42
	P12	4,4	41
	P13	2,6	56
	P18	16,1	60
	DEN	21	35
	VILL	4,7	87
	VIT	2,7	50
	ULIS	5	165

	Stations	Hauteur prélevement (m)	Altitude (m)
PÉRIURB	MAN	4,3	29
	MEL	3,7	64
	TREM	4,6	66
	VER	4,1	133

	Stations	Hauteur prélevement (m)	Altitude (m)
RURALE	RurE	3,5	115
	RurNE	8,6	160
	RurNW	4	125
	RurW	4	117
	RurSE	4,6	127
	RurSW	18	154
	RurN	4,5	158

L'altitude des stations est estimée à partir de Google Earth

Tableau IV.1 : Altitude au dessus du niveau de la mer et hauteurs de prélèvements des stations de fond (urbaine, périurbaine, rurale) appartenant au réseau Airparif ; sources des données : Airparif, Google Earth

La station d'observation (Tour Eiffel)

Une station dite d'*observation* est située au 3^{ème} étage de la Tour Eiffel (à 300 m du sol). Elle permet d'étudier la variabilité verticale de la pollution de l'air. Les données de concentration de NO₂ et d'O₃ issues de cette station ont environ un quart de valeur manquante de 2000 à 2012. Elles ne seront donc utilisées qu'à titre d'exemple pour étudier la variabilité verticale de l'O₃.

IV.1.3. Les méthodes de mesure des polluants

L'air extérieur est aspiré au niveau de la tête de prélèvement dans les stations de mesure puis acheminé vers différents analyseurs. Les méthodes ne sont pas les mêmes selon les polluants mesurés :

- l'O₃ est mesuré par la méthode d'absorption du rayonnement ultraviolet (Mathe *et al.*, 2009) ;
- les NO_x par chimiluminescence (Guillard et Godet, 2001, a, b, c) ;
- les particules PM₁₀ et PM_{2,5} par balance microélectronique TEOM (de l'anglais *Tapered Element Oscillating MicroBalance*) couplée depuis 2007 à la méthode FDMS (système de filtrage dynamique).

Depuis le 1^{er} janvier 2007, les analyseurs TEOM-FDMS sont utilisés en routine par les stations Airparif (Ustache et Favez, 2009). La méthode TEOM sous-estimait les particules semi-volatiles car celles-ci se volatilisaient lors de la mesure réalisée à 50°C afin d'éliminer l'eau présente sur les particules atmosphériques. La méthode TEOM-FDMS est pourvue d'une colonne de séchage, caractérisée par les températures du point de rosée amont et aval du sécheur. Les données issues de cette méthode ne sont pas comparables à celle mesurées avant 2007. Pour cela, nous utiliserons uniquement des données du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012 pour les PM₁₀ et PM_{2,5}.

Données issues des stations et lacunes

L'air est prélevé et analysé en continu dans les stations Airparif. Chaque quart d'heure, une moyenne est faite sur les données mesurées en continu. Les données sont ensuite validées par Airparif (75% des données de quart-horaire doivent être valides) et des moyennes horaires et journalières sont ensuite établies. Celles-ci sont disponibles sur le site d'Airparif : www.airparif.asso.fr.

Afin d'étudier les variations spatiales et temporelles des taux d'O₃ et de NO₂, nous avons sélectionné des données journalières du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2012 issues de 19 stations Airparif pour l'O₃ et 21 stations pour les NO₂. Les données de 14 stations ont été utilisées du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012 pour les PM₁₀ et 4 stations pour les PM_{2,5} (fig. IV.3). Cependant, elles présentent quelques lacunes et le réseau de stations a évolué entre 2000 et 2012 : certaines stations ont été fermées périodiquement ou définitivement et d'autres ont été ouvertes. Toutes les séries de données ont moins de 6% de lacunes et de valeurs manquantes. Nous avons choisi le seuil de 6% et non de 5% car il permet d'inclure un plus grand nombre de stations trafic.

Les données horaires des taux d'O₃ et de NO₂ ont été étudiées avec un plus grand nombre de stations : 27 stations pour l'O₃ et 30 pour le NO₂ du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012.

Pour expliquer les variabilités spatiale et temporelle des concentrations en ozone, dioxyde d'azote et particules, les données Airparif ont été traitées et mises en relation avec des données météorologiques.

IV.1.4. Les données météorologiques issues des stations de mesure Météo France

Nous avons utilisé des données journalières et horaires issues de la station Paris Montsouris et Orly appartenant au réseau Météo France (fig. IV.3). Les données journalières sont :

- la température moyenne sous abri en °C ;
- la moyenne des vitesses du vent (à 10 mètres) en m/s ;

- le taux d'humidité relative moyenne en % ;
- la durée d'insolation en minute : elle désigne la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet fixe est soumis à insolation au cours d'une période donnée que l'on choisit, sauf indication contraire, comme égalant un jour entier, soit 24 heures à partir de minuit ;
- la direction moyenne en ° et la vitesse du vent moyen journalier à 10 m ;
- le rayonnement solaire global (J/cm^2).

IV.1.5. Les bulletins climatiques quotidiens

Afin d'étudier la situation météorologique synoptique qui influence la pollution de l'air, nous avons utilisé les bulletins climatiques quotidiens d'analyse en surface issus du site <http://www.wetterzentrale.de/> et ceux de Météo France, ainsi que les bulletins climatiques mensuels de Météo France : http://climat.meteofrance.com/chgt_climat2/bilans_climatiques

IV.1.6. Les radiosondages

Nous avons analysé les radiosondages lancés de la station météorologique de Trappes, particulièrement à 00h UTC, afin de repérer les jours avec une inversion thermique matinale (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). La ville de Trappes étant située à une trentaine de kilomètres du centre de Paris, les comparaisons avec les concentrations issues des stations d'Airparif réparties dans toute l'Île-de-France sont à prendre avec précaution.

IV.1.7. Les rétrotrajectoires des masses d'air

L'ozone et les particules peuvent être transportés sur plusieurs centaines de kilomètres en suivant les masses d'air avant d'arriver en Île-de-France (Dudouit Fichet, 2006 ; Shan *et al.*, 2009 ; Davis *et al.*, 2010). Pour étudier cette pollution continentale, nous avons étudié les rétrotrajectoires des masses d'air lors des épisodes de pollution de ces polluants que nous avons sélectionnés. Les rétrotrajectoires se définissent par le parcours le plus vraisemblable d'une masse d'air avant d'arriver en un point donné selon un certain laps de temps et une altitude donnée au départ ou à l'arrivée. Les rétrotrajectoires des masses d'air que nous avons utilisées sont calculées à partir du modèle HYSPLIT (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* ; Draxler et Hess, 2004). Elles sont disponibles sur le site de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration* ; <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

Les données météorologiques d'entrée du modèle, telles que la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique (*etc.*), sont issues aussi d'un modèle GDAS (<http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/gdas/>).

Les rétrotrajectoires ont été calculées pour une altitude de 100, 500 et 1000 m au dessus du niveau du sol, avec un départ variant de 48 h à 72h quand les taux sont les plus élevés durant les épisodes de pollution, et avec Paris comme point d'arrivée (fig. IV.4).

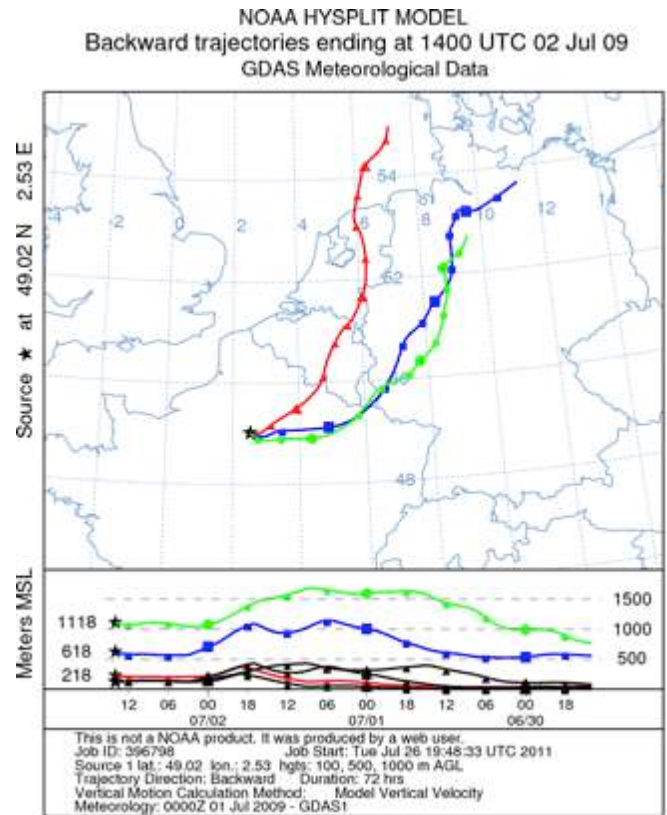


Figure IV.4 : Exemple de rétrotrajectoire du 2 juillet 2009 à 14h UTC, d'une durée de 72h ; source : <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>

IV.2. Les approches méthodologiques du traitement des taux de polluants et des données météorologiques

L'objectif de la deuxième partie est de caractériser les variabilités spatiale et temporelle des concentrations d'O₃, de NO₂, de PM₁₀ et de PM_{2,5} à l'échelle régionale. Les données journalières et horaires des concentrations ont été étudiées avec des statistiques descriptives : univariées, bivariées et analyses en composante principale (ACP).

IV.2.1. Étude descriptive à l'aide de statistiques univariées et bivariées

La statistique univariée est une approche descriptive pour étudier les variables une par une. Elles visent à résumer l'information contenue dans chaque variable au moyen de paramètres de position (moyenne, médiane, mode) et de dispersion (écart-type, coefficient de variation, intervalle interquartile, etc.). Les taux journaliers et les taux horaires d'O₃, NO₂, de PM₁₀ et de PM_{2,5} sont résumés pour caractériser l'évolution des moyennes annuelles, les cycles mensuels,

hebdomadaires et journaliers des polluants, ainsi que les variations spatiales des polluants à l'échelle régionale. Ces variations spatiales et temporelles sont représentées visuellement à l'aide de courbes et de boîtes de dispersion, réalisées à l'aide du logiciel R (fig. IV.5). La hauteur de la boîte de dispersion correspond à l'intervalle interquartile ($Q3-Q1$).

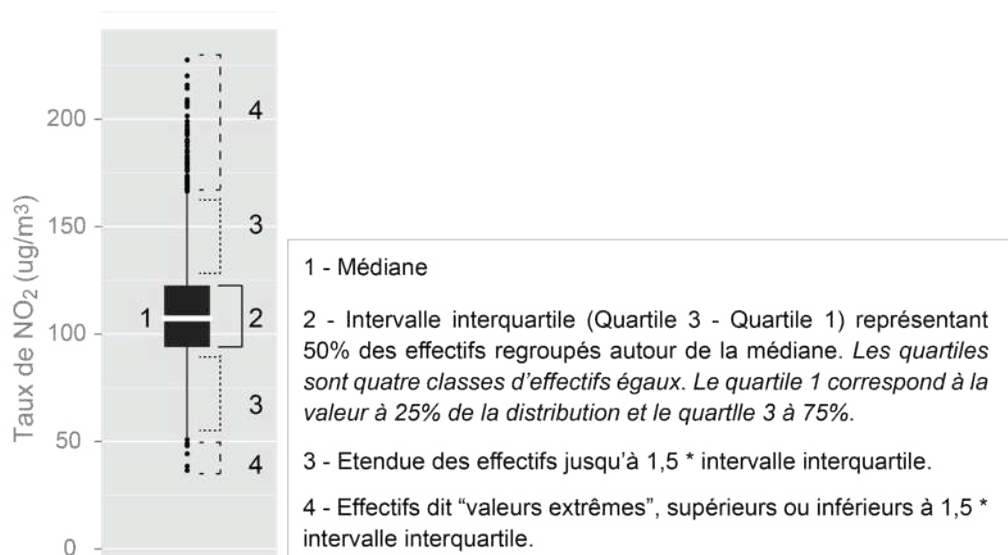


Figure IV.5 : Exemple d'une boîte de dispersion avec les concentrations journalières des taux de NO_2 à la station PERI du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2012; *source des données : Airparif*

Les statistiques bivariées mettent en évidence une relation entre deux variables. Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson a été utilisé pour étudier l'intensité et le sens de relation linéaire entre les concentrations de polluants et les différents paramètres météorologiques (température, humidité, vitesse du vent, insolation, radiation solaire globale). Les valeurs des coefficients sont comprises entre -1 et +1 ; l'intensité de la relation est d'autant plus forte que le coefficient est proche de -1 ou +1, et inversement, elle est d'autant plus faible ou inexistante que le coefficient se rapproche de 0. Si le coefficient est positif, les deux variables évoluent linéairement dans le même sens. Si le coefficient est négatif, les deux variables évoluent linéairement dans le sens contraire. Pour un risque d'erreur alpha, la significativité de la relation linéaire entre deux variables va varier selon le nombre d'individus de la distribution. La table de Bravais-Pearson fournit les valeurs du coefficient de corrélation au-delà duquel le coefficient est significatif selon un degré de liberté défini suivant la taille de l'échantillon n (degré de liberté = $n-2$).

IV.2.2. Analyses en composantes principales

Les analyses multivariées ont pour caractéristique de s'intéresser à la distribution conjointe de plusieurs variables afin de dégager de grandes caractéristiques et tendances. L'analyse en

composantes principales (ACP) permet d'isoler la partie considérée comme non structurée de la distribution et de mettre en évidence des axes qui expliquent le mieux la dispersion des individus. Cette méthode statistique consiste à transformer les variables liées l'une à l'autre en utilisant la transformation orthogonale pour créer des nouvelles variables, non corrélées les unes aux autres, appelées facteurs ou axes. Elle s'applique en croisant des individus et des variables quantitatives. Le premier facteur explique la plus grande proportion de variabilité. Le deuxième facteur explique une fraction moindre de la variance de données que le premier facteur et ainsi de suite.

Des ACP sont réalisées pour caractériser la variabilité spatio-temporelle de la pollution de l'air dans une région à partir des données issues des réseaux de stations automatiques. Elles permettent de dégager des stations de mesure qui ont une dispersion similaire et d'en déduire les facteurs de cette dispersion (proximité des sources d'émission, conditions météorologiques, topographie, etc.). Elles sont aussi utilisées, souvent couplées avec une classification hiérarchique ascendante, pour déterminer les stations qui mesurent des informations redondantes du réseau de stations de mesure automatique. Par exemple, des ACP ont été réalisées sur les concentrations de NO₂, PM₁₀ issues du réseau de stations automatiques dans les régions de Santiago, de Porto et de Hong Kong (Gramsch *et al.*, 2006; Pires *et al.*, 2008a, b; Lau *et al.*, 2009). Les résultats mettent en évidence une variabilité spatiale fortement dépendante des sources d'émission et principalement du trafic routier. A Hong Kong, le premier facteur de l'ACP réalisé sur des taux journaliers de NO₂ mesurés dans des stations trafic et de fond réparties sur tout le territoire, met en évidence les stations à proximité du trafic et celles dites urbaines, dans le centre de l'agglomération. Le second facteur met en évidence les stations du nouveau territoire, éloignées du centre urbain. Le troisième facteur met en évidence la seule station rurale de Hong Kong. Les facteurs sont donc représentatifs d'une dispersion des concentrations de NO₂ dépendant des sources d'émission.

Afin de dégager les principales caractéristiques spatio-temporelles des concentrations d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀ à l'échelle de la région parisienne, nous avons réalisé trois ACP par polluant en croisant les concentrations journalières par station (variables) du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012 (individus). Les valeurs ont été centrées-réduites. Les ACP portent sur 26 stations de fond pour l'O₃, 28 stations de fond pour le NO₂ et 11 stations de fond pour les PM₁₀ (fig. IV.3). Pour le NO₂ et les PM₁₀, trois stations trafic ont aussi été utilisées : celle de l'autoroute A1 à St Denis (A1), celle du boulevard périphérique située à la porte d'Auteuil (PERI) et celle située place Victor Basch dans le 14^{ème} arrondissement parisien (BAS). Pour choisir le nombre d'axes à conserver, nous avons utilisé le critère Kaiser, c'est-à-dire les facteurs avec une valeur propre supérieure à 1 (Jolliffe, 2002).

Les données Airparif ont été étudiées afin de dégager les tendances temporelles et spatiales des concentrations d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules, et de mettre en évidence les épisodes de pollution. Elles ont été mises en relation avec des données météorologiques, issues des stations Météo France, du radiosondage de Trappes et de rétrotrajectoires, afin d'expliquer les variabilités.



Chapitre V

Contexte régional et variabilité spatio-temporelle des taux d’ozone, de dioxyde d’azote et de particules en région parisienne

L’exposition de chaque individu dépend des niveaux de pollution de l’air à l’échelle régionale. Comme nous l’avons vu dans le chapitre I, ils varient selon les conditions de trafic et les conditions météorologiques. L’objectif de ce chapitre est de mettre en exergue les tendances, les cycles temporels et les variations spatiales des concentrations d’ozone, de dioxyde d’azote et de particules à l’échelle régionale. Pour cela, le contexte topographique et climatique, les émissions franciliennes et les niveaux annuels de pollution sont présentés dans un premier temps. Les concentrations journalières issues du réseau de mesures sont analysées, à l’aide d’une analyse en composantes principales, et elles sont mises en relation avec les émissions et les conditions météorologiques dans un second temps. Enfin, des spécificités de variabilité spatiale et temporelle des concentrations observées au niveau horaire seront présentées.

V.1. Contexte régional et niveaux de pollution en région parisienne

V.1.1. Un site favorable à la dispersion de la pollution de l’air

Le relief de la région parisienne est relativement faible (fig. V.1). Il facilite la dispersion des polluants, contrairement aux villes situées en fond de vallée où la pollution de l’air s’accumule la nuit lors de situation radiative à cause des inversions thermiques et brises (Oke, 1987). Les stations situées, par exemple celles de Garches et Les Ulis, à une altitude plus élevée en région parisienne peuvent avoir des taux d’ozone plus élevés la nuit en situation radiative car elles peuvent se trouver au dessus de la couche limite (*cf.* chapitre I).

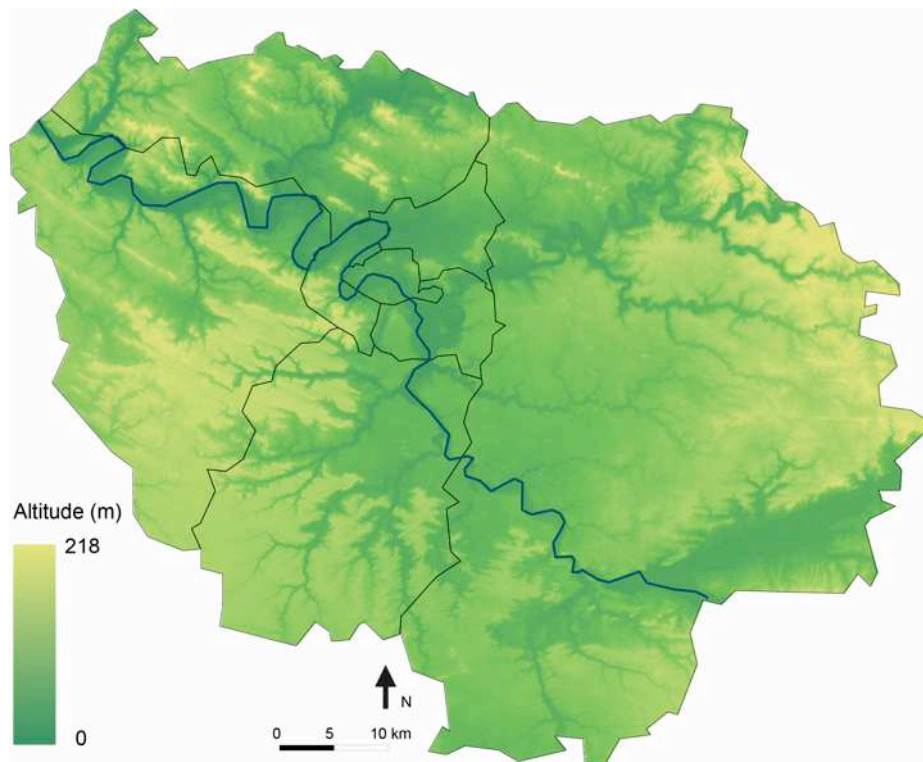


Figure V.1 : Relief de l'Île-de-France à partir du SRTM 90 m ; source : CGIAR International Research Centers

Le climat de la région parisienne, sous l'influence des flux d'ouest, est favorable à la dispersion de la pollution de l'air (Alary *et al.*, 1995). La figure V.2 présente les fréquences des directions du vent moyen maximal selon des classes des moyennes des vitesses du vent à 10 mètres pour les quatre saisons de 2000 à 2012 à la station Paris Montsouris de Météo France. La carte montre que les vents sont principalement de sud ouest. Au printemps et en hiver, les vents de nord sont aussi très fréquents, ramenant fréquemment des masses d'air froid facilitant les inversions thermiques matinales et les concentrations de pollution.

15% des vitesses de vent sont inférieures à 2 m/s entre 2000 et 2012 à Paris Montsouris. Ces brises ne permettent pas la dispersion de la pollution (*cf.* chapitre I). 43% des vitesses de vent sont comprises entre 2 et 3 m/s, et 41% sont supérieures à 3 m/s. La majorité des vents arrivant en région parisienne facilite donc la dispersion de la pollution de l'air. Cependant, ces vents sont mesurés à 10 m. La rugosité de la morphologie urbaine peut affaiblir les vents près du sol, empêchant la dispersion de la pollution atmosphérique. Les vents sont plus calmes en été que durant les autres saisons. Les temps sont plus souvent radiatifs sous l'influence de l'anticyclone des Açores pouvant faciliter la formation et la concentration de l'O₃.

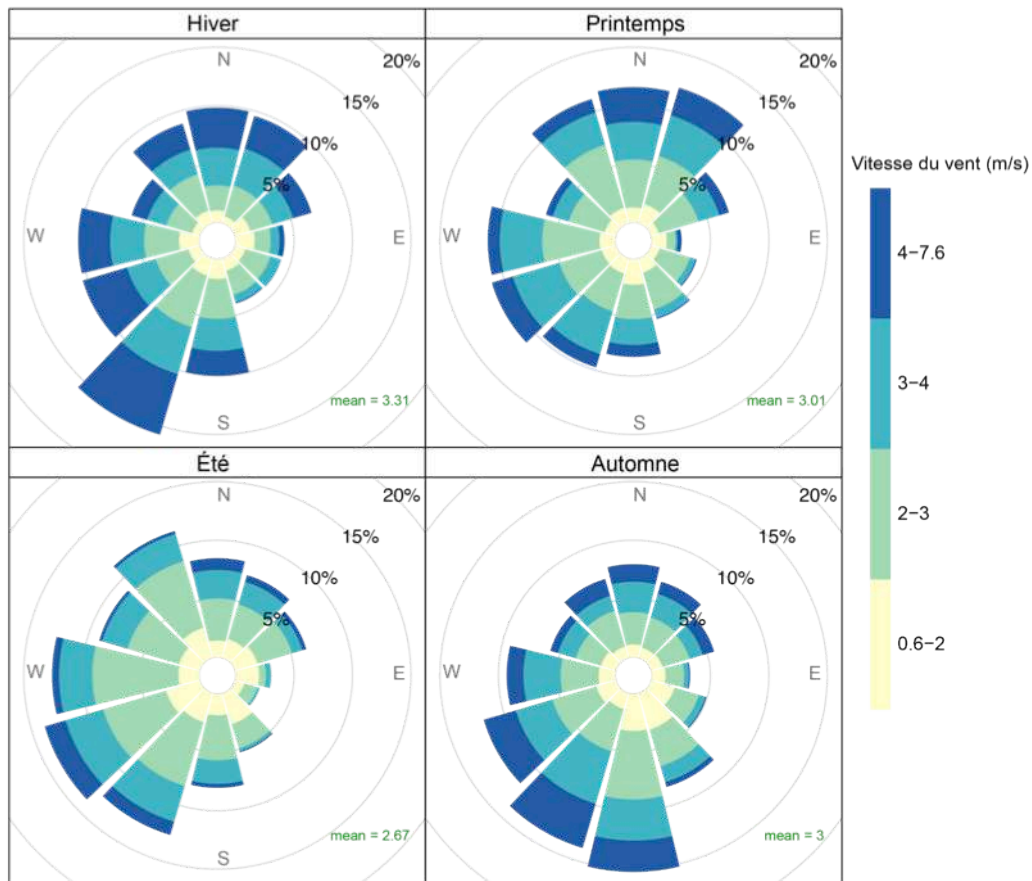


Figure V.2 : Fréquence des directions du vent moyen maximal selon les moyennes des vitesses du vent à 10 m et par saison du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2012 à la station Paris Montsouris, *source des données : Météo France*

V.1.2. Une densité importante d'émission de polluants

Avec 12 millions d'habitants, la métropole parisienne regroupe un cinquième de la population française. Elle est densément peuplée (976,5 hab./km² en 2012). Sa forte densité de population et d'activités anthropiques (trafic, industrie, chauffage...) engendre de fortes émissions de polluants. Le trafic routier est le premier émetteur d'oxydes d'azote en Île-de-France, et le deuxième, pour les particules (*cf.* chapitre I). Le secteur résidentiel est le premier émetteur de particules, principalement à cause du chauffage (Airparif, 2009a). L'industrie est le troisième émetteur d'oxydes d'azote et de particules.

Le volume du trafic routier est en légère augmentation depuis 1999 pour l'ensemble du réseau francilien (fig. V.3). Le temps passé dans la circulation a augmenté depuis 2008. Dans le détail, le volume du trafic routier a augmenté sur certains grands axes (A86, la Francilienne) et a diminué ou stagné sur d'autres axes (axes du boulevard périphérique à l'A86, et de l'A86 à la Francilienne ; DIRIF, 2012). Dans Paris *intra-muros*, le trafic routier était en baisse depuis 1999 et s'est stabilisé depuis 2009 mais avec une augmentation de la vitesse (Observatoire des déplacements à Paris, 2012). En France, le pourcentage de véhicules avec un moteur diesel est

passé de 8% en 1980 à 63% en 2011. Les véhicules roulant au diesel émettent beaucoup de particules qui sont cancérigènes (OMS, 2012). Depuis le 1^{er} février 2011, les filtres à particules sont obligatoires en France pour les nouveaux véhicules diesels suivant les normes européennes d'émission (normes Euro 5, règlement (CE) n°715/2007 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2007). Cependant, les particules les plus grossières sortant du moteur sont fractionnées en particules plus fines, plus dangereuses pour la santé car elles s'infiltrant plus facilement dans les voies respiratoires (Marano, 2012). De plus, les filtres à particules produiraient plus de dioxyde d'azote (Afsset, 2009a). Selon le rapport de Airparif sur la qualité de l'air à Paris en 2010, le ratio NO_2/NO_x aurait doublé depuis 10 ans. Cette tendance à proximité du trafic routier s'expliquerait par une augmentation sensible de la proportion du dioxyde d'azote (NO_2) par rapport au monoxyde d'azote (NO) dans les émissions des nouveaux filtres à particules catalysés qui équipent actuellement une grande majorité des véhicules roulant au diesel (Airparif, 2010).

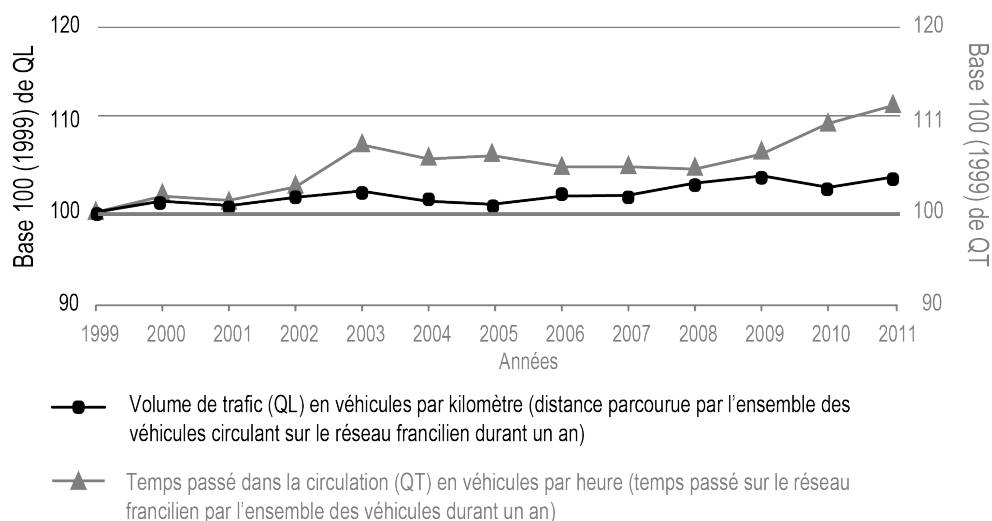


Figure V.3 : Évolution du trafic routier de 1999 à 2012 à partir de l'indice base 100 (de 1999) ; source : DIRIF, 2012

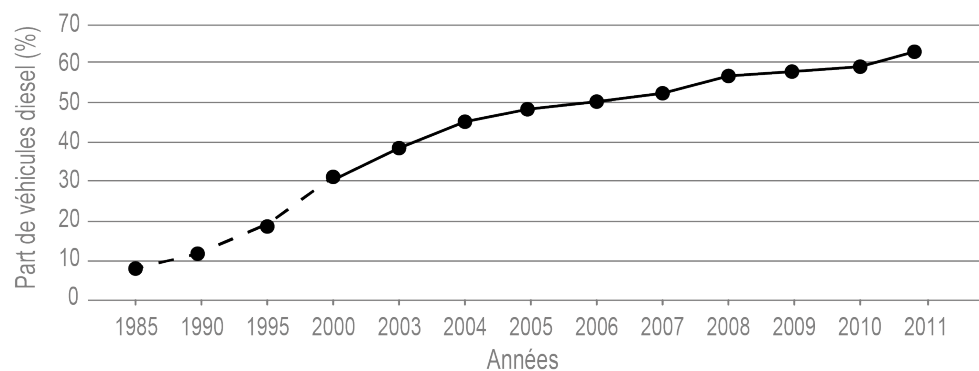


Figure V.4 : Évolution de la part de véhicule diesel dans le parc automobile français de 1985 à 2011 ; source des données : <http://www.ccfa.fr/>

Le secteur résidentiel est le premier émetteur de particules en Île-de-France. Le chauffage au bois émet beaucoup de particules (Gazeau *et al.*, 2011). Entre septembre 2009 et septembre 2010 en Île-de-France le chauffage au bois est estimé à 7% des émissions de PM10 (Airparif, 2011b ; fig. V.5). Le chauffage contribue à l'augmentation des taux de PM10 en période hivernale en niveau de fond en Île-de-France. Dans Paris, le chauffage au bois est très réglementé par l'article 23 de l'arrêté du 22 janvier 1997 créant une zone de protection spéciale contre les pollutions atmosphériques en Île-de-France. Les cheminées sont de plus en plus équipées de filtres à particules, limitant les émissions de particules grossières. Néanmoins, comme pour les filtres des véhicules, les particules sont fractionnées en particules plus fines émises dans l'atmosphère.



Figure V.5 : Émission de particules par les cheminées en région parisienne ; photographie prise le 10 décembre 2011 à 9h30 à Maisons-Alfort

Depuis une vingtaine d'années, les industries sont soumises à des réglementations pour limiter la pollution émise. De nombreuses réglementations, particulièrement de l'Union Européenne, visent à améliorer la qualité de l'air en diminuant les sources d'émission. Dans la partie suivante, l'évolution des niveaux temporels des taux d'O₃, de NO₂, de PM10 et de PM2,5 est étudiée entre 2000 et 2012.

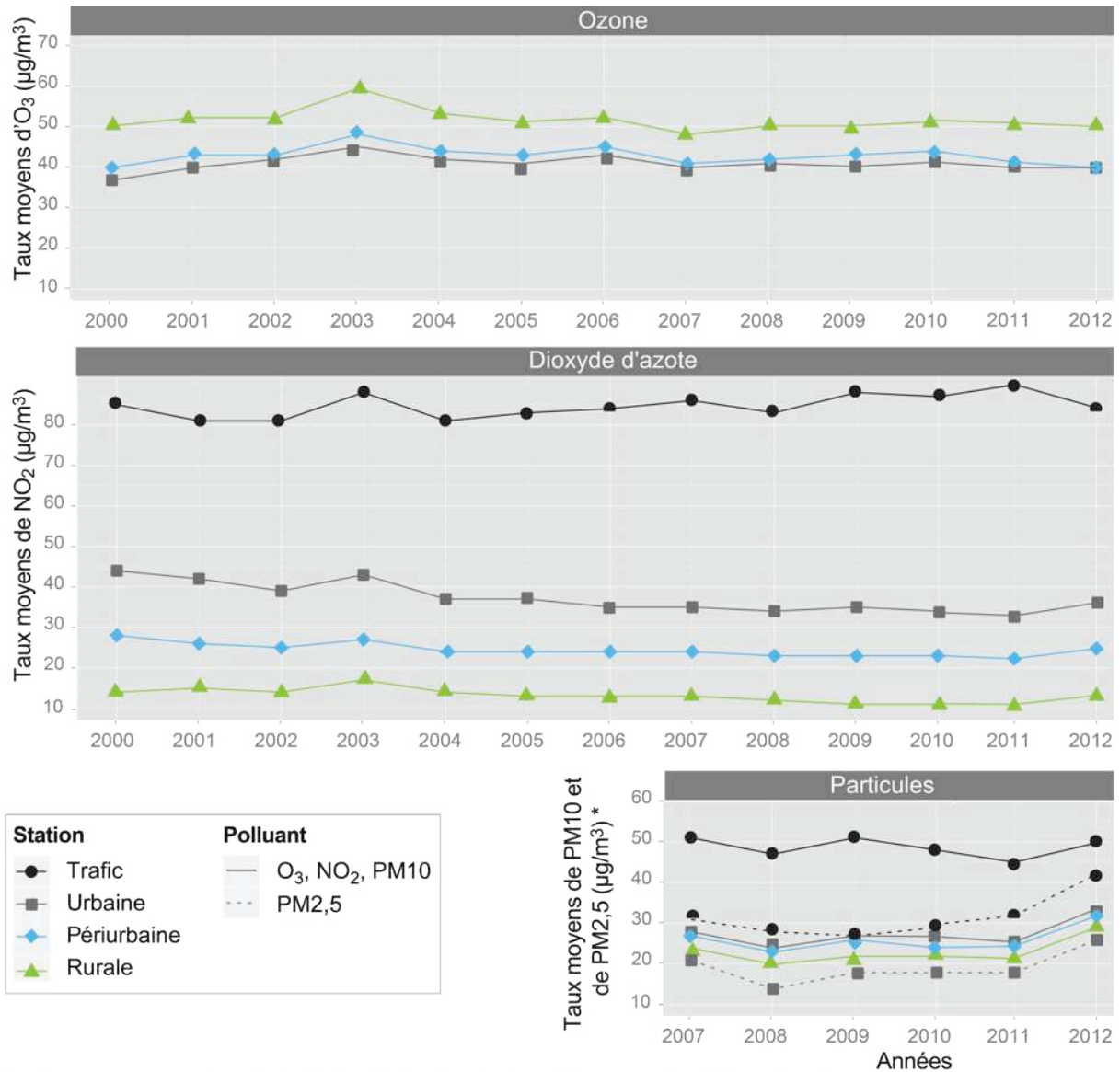
V.1.3. Stagnation des niveaux annuels d'O₃, de NO₂, de PM10 et de PM2,5 de 2000 à 2012

La figure V.6 présente les taux moyens annuels d'O₃, de NO₂, de PM10 et de PM2,5 selon les différents types de station (trafic, urbaine, périurbaine et rurale) sur une période de 2000 à 2012 pour l'O₃ et le NO₂, et 2007 à 2012 pour les particules. En niveau de fond, une relative

stabilité des concentrations est observée pour les quatre polluants. Ils sont très variables d'une année à l'autre et il est difficile d'en déduire une tendance. Les concentrations moyennes mesurées en 2012 pour les stations franciliennes sélectionnées en fond étaient de 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l' O_3 , 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le NO_2 , 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$. Les niveaux d' O_3 sont plus élevés en zone rurale (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour 2012) qu'en zone urbaine (37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour 2012), et inversement pour les taux de NO_2 (14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les stations rurales et 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les stations urbaines). Ce qui s'explique par la titration de l' O_3 par le NO .

Les niveaux de NO_2 et de particules sont plus élevés à proximité du trafic routier (75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le NO_2 , 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ en 2012). Les valeurs limites annuelles fixées à 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et à 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ sont dépassées. Les niveaux annuels de NO_2 ont globalement augmenté de 2001 à 2011 d'environ 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cependant, en 2012, les taux étaient équivalents à ceux mesurés en 2001.

Les niveaux d' O_3 , de NO_2 , de PM_{10} et de $\text{PM}_{2,5}$ fluctuent d'une année à l'autre selon les conditions météorologiques. En 2003, les niveaux annuels d' O_3 et de NO_2 sont plus élevés que les autres années. Les concentrations d' O_3 mesurées ont été très importantes durant la première quinzaine du mois d'août, période de canicule : 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour les stations dans l'agglomération parisienne et 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour les stations situées en milieu rural, c'est-à-dire deux fois supérieures à la moyenne du mois d'août entre 2000 et 2010. Le seuil de recommandation et d'information fixé à 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une heure a été dépassé tous les jours du 1^{er} au 14 août 2003. Durant cette période, la situation anticyclonique avec des températures élevées (températures maximales entre 35°C et 40°C), un fort ensoleillement et peu de vent ont favorisé la formation de l'ozone et sa concentration (Airparif, 2003). Les taux mesurés de NO_2 au mois d'août 2003 sont, quant à eux, en moyenne, 20% plus élevés dans les stations *urbaines*, *périurbaines* et *trafic*, et 50% plus élevés dans les stations *rurales* que la moyenne en août, calculée de 2000 à 2012. Les taux de NO_2 ont été particulièrement élevés durant la canicule de 2003. Le seuil de recommandation et d'information fixé à 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur une heure a été dépassé dans les stations *trafic*. Le NO_2 se forme à partir du NO par réaction avec d'autres oxydants de l'air tel que l' O_3 . La forte quantité d' O_3 dans l'atmosphère durant cette période a donc facilité la formation du NO_2 au contact du NO . Les concentrations de NO_2 et d' O_3 sont particulièrement élevées mi et fin septembre 2003, expliquant aussi les concentrations annuelles plus élevées que la moyenne. En 2006, la moyenne annuelle d' O_3 est aussi élevée, correspondant à quelques jours avec des conditions météorologiques similaires à la deuxième quinzaine de juillet qu'en août 2003. Les concentrations de particules sont, quant à elles, particulièrement élevées en 2007, 2009 et 2012, en raison d'épisodes de pollution hivernaux et printaniers, développés dans le chapitre suivant.



Les taux moyens annuels sont calculés à partir des données journalières issues des stations Airparif :

- Pour l'O₃ : 8 stations urbaines, 4 stations périurbaines et 6 stations rurales
- pour le NO₂ : 4 stations trafic, 12 stations urbaines, 3 stations périurbaines et 2 stations rurales
- pour les PM10 : 3 stations trafic, 7 stations urbaines, 2 stations périurbaines et 2 stations rurales
- pour les PM2,5 : 1 station trafic et 2 stations urbaines

* La méthode de mesure des PM10 et des PM2,5 ayant évolué depuis 2007 et les données non comparables avant et après 2007, les moyennes sont calculées à partir de 2007 pour les particules.

Figure V.6 : Variation des taux moyens annuels d'O₃, de NO₂ du 1er janvier 2000 au 31 décembre 2012 et des taux de PM10 et PM2,5 du 1er janvier 2007 au 31 décembre 2012 ; source des données : Airparif

Les niveaux annuels d'O₃, de NO₂, de PM10 et de PM2,5 sont variables d'une année à l'autre suivant les conditions météorologiques. Les deux parties suivantes détaillent les variabilités temporelles des taux journaliers et horaires de ces polluants, en les mettant en parallèle avec les conditions d'émission et météorologiques.

V.2. Variabilité spatio-temporelle des concentrations journalières d'O₃, de NO₂, de PM₁₀ et de PM_{2,5}

Cette partie vise à décrire les variations spatiales et temporelles de ces polluants en région parisienne, et à mettre en exergue les facteurs qui expliquent ces variabilités. Elle présente les résultats des trois analyses en composante principale (ACP) qui ont été réalisées sur les taux journaliers d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀ du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012, dans plusieurs stations de trafic et de fond franciliennes du réseau Airparif (*cf.* Chapitre IV).

V.2.1. Dispersion relativement uniforme des concentrations de polluants issues des stations franciliennes

Le premier axe des ACP réalisé indépendamment sur les taux d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀ du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012 mesurés dans des stations trafic et de fond explique l'essentiel de la variance des données analysées : 92% pour l'O₃, 93% pour les PM₁₀ et 80% pour les NO₂. Seul le premier facteur est retenu pour les concentrations d'O₃ et de PM₁₀. Tous les autres facteurs ont une valeur propre inférieure à 1 et une variance très faible. Pour le NO₂, nous avons retenu les facteurs 2 et 3 avec une valeur propre respectivement égale à 1,5 et 1,2, et un pourcentage de variance de 5% et 4%.

Variabilité des taux journaliers relativement similaire en région parisienne

Toutes les variables, taux journaliers par station, sont fortement corrélées au premier axe pour les trois polluants. Pour les taux d'O₃, les 26 stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) ont une forte corrélation positive et contribution au premier axe : leurs coordonnées se situent entre 0,90 et 0,99. Il en est de même pour les résultats de l'ACP réalisée sur les taux de PM₁₀ : les coordonnées des trois stations trafic et des onze stations de fond sur le premier axe se situent entre 0,86 et 0,99. Les trois stations trafic et les vingt-sept stations de fond mesurant les taux de NO₂ sont, elles aussi, toutes corrélées positivement au premier facteur, avec coordonnées entre 0,66 et 0,97.

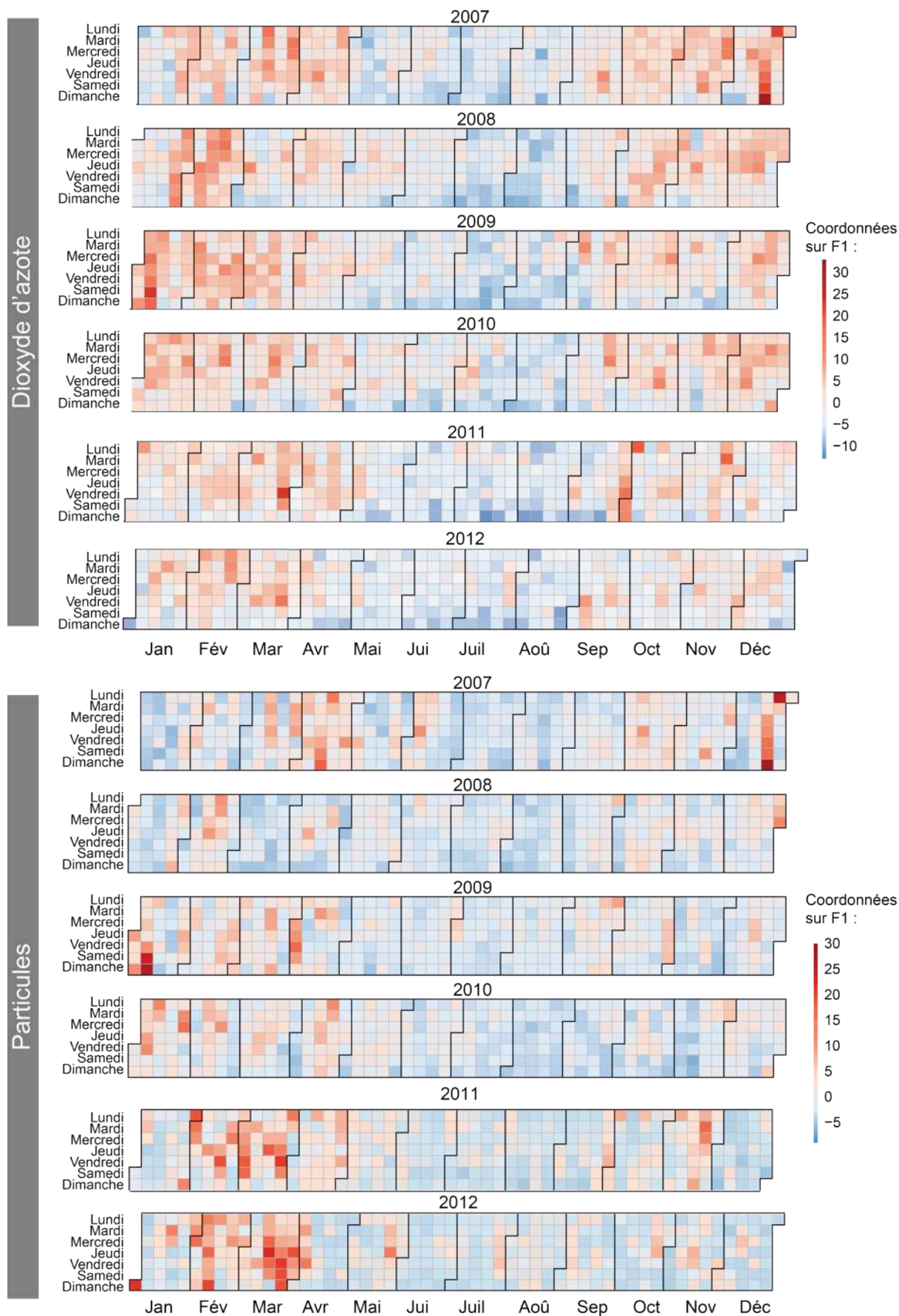
La figure V.7 représente les coordonnées des individus du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2010 sur l'axe 1 pour les ACP réalisées sur les taux moyens journaliers d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀. Les mois sont représentés en abscisse et les jours de la semaine sont représentés en ordonnée pour les six années étudiées. Chaque case représente la coordonnée du jour sur l'axe 1. Les jours où les coordonnées sont fortes, les concentrations d'O₃, de PM₁₀ ou de NO₂ étaient élevées dans toute la région parisienne. En prenant par exemple, les 5% des jours avec les coordonnées les plus fortes, les taux moyens journaliers d'O₃, de PM₁₀ et de NO₂ étaient respectivement égaux à 84 µg/m³, 69 µg/m³ et 72 µg/m³ en moyenne pour toutes les stations. A l'inverse, les taux moyens journaliers d'O₃, de PM₁₀ et de NO₂ pour les 5% des jours avec les coordonnées

négatives étaient respectivement égaux à 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour toutes les stations.

Le premier axe indique donc une dispersion uniforme des concentrations journalières d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀ pour toutes les stations franciliennes : si l'écart à la moyenne est positif pour une station, il a tendance à l'être pour toutes les autres stations du réseau, et inversement s'il est négatif. Ce résultat est différent des ACP réalisées dans d'autres villes où le premier axe a aussi une forte variance opposant les jours avec des fortes concentrations et ceux avec des faibles, mais les stations ne sont pas toutes corrélées au premier axe, indiquant une variabilité différente selon le type de station (Gramsch *et al.*, 2006; Pires *et al.*, 2008a, b; Lau *et al.*, 2009). Cette variabilité assez homogène dans toute l'Île-de-France s'explique par le site de la région parisienne avec une faible topographie. Les sources d'émission sont les plus denses dans l'agglomération parisienne mais elles suivent un cycle régulier entraînant des variations de niveau de fond dans toute la région parisienne. Les stations trafic, par exemple, ne sont pas mises en exergue dans cette étude car leurs concentrations journalières sont plus élevées les jours où le niveau de fond est le plus fort, comme pour les stations de fond. Le choix des emplacements des stations franciliennes qui se veut être un maximum représentatif de la pollution de l'air respiré par le plus grand nombre de franciliens (*cf.* chapitre II) explique peut-être que les concentrations mesurées fassent ressortir une variabilité temporelle homogène selon les stations, et non des particularités de sites. Il n'existe, par exemple, pas de stations industrielles dans la classification des stations franciliennes. Celles-ci auraient pu avoir une variance dépendante du site industriel proche.

Différence de niveaux de pollution selon la proximité du trafic routier

Les trois stations trafic (PERI, A1, BAS) sont fortement corrélées au premier axe pour les ACP réalisées à partir des concentrations journalières de NO₂ et de PM₁₀, ainsi qu'à l'axe 2 et 3 pour le NO₂. Les concentrations journalières de NO₂ et de PM₁₀ sont plus élevées à proximité du trafic routier qu'en niveau de fond, quelque soit la journée. Les 5% des jours durant lesquels les taux journaliers sont les plus forts dans toute l'agglomération parisienne, les niveaux de NO₂ sont en moyenne égaux à 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les stations trafic et à 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les stations de fond de 2007 à 2012. Le résultat est similaire pour les PM₁₀ lorsque les concentrations sont élevées : 135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les stations trafic et 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les stations de fond.



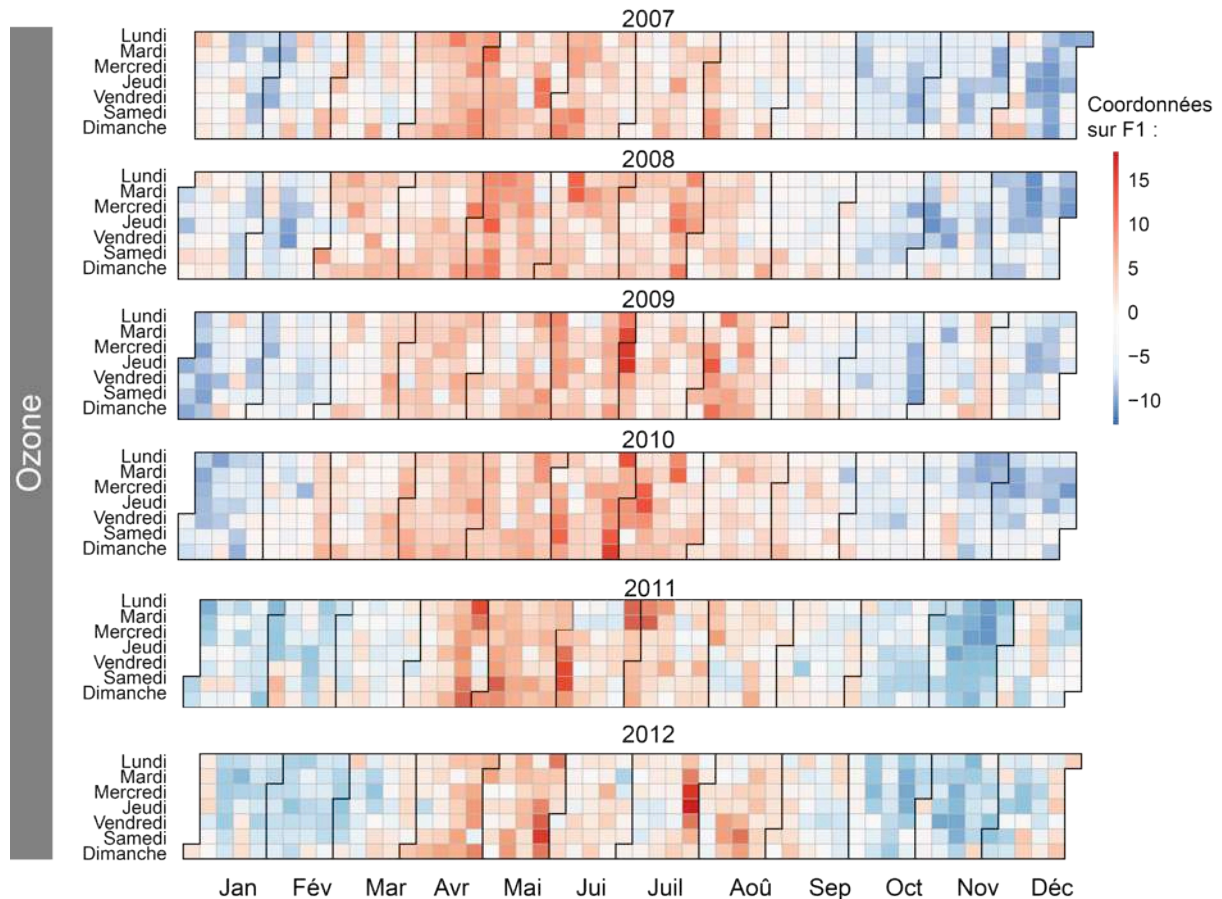


Figure V.7 : Coordonnées de chaque jour du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012 sur l'axe 1 des ACP réalisées sur les taux journaliers moyens d'O₃, NO₂ et PM₁₀ ; *source des données : Airparif*

Les taux de PM₁₀ sont plus élevés en moyenne sur l'autoroute A1 à Saint-Denis (A1) que sur le boulevard périphérique au niveau de la Porte d'Auteuil (PERI) ainsi que sur la place Victor Basch (BAS) : respectivement, 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière de 2007 à 2012. Une première hypothèse est que la densité du trafic routier est plus importante à proximité de la station A1 que dans les autres stations : la station étant située au bord de l'autoroute A1 et proche de l'A86 (fig. V.8). Cependant, les taux de NO₂, bon traceur du trafic routier, sont plus élevés sur le boulevard périphérique que sur l'autoroute A1. La station se situe au niveau de la Plaine Saint-Denis, espace en pleine mutation depuis une vingtaine d'années suite à la reconversion des friches industrielles en pôle d'activités (Direction de la communication de Plaine Commune, 2010 ; <http://www.plainecommune.fr/>). Les chantiers sont donc nombreux à proximité et expliquent donc, peut-être en partie, que les taux soient plus forts dans cette zone là. Pour pouvoir le certifier, des analyses sur la composition des particules seraient utiles afin de connaître leurs origines. Ce qui n'a pu être réalisé dans le cadre de cette thèse. De plus, la station est à côté d'un centre de recherches de Gaz de France dont les cheminées émettent des particules.



Figure V.8 : Localisation de la station trafic de l'autoroute A1 à Saint-Denis ; fond de carte : Geoportail, 2011

Variabilité spatiale des concentrations de NO_2 selon la direction du vent

Certaines stations de fond sont fortement corrélées aux axes 2 et 3. La figure V.9 représente les corrélations des stations de fond sur les axes 2 et 3 de l'ACP réalisée sur les concentrations de NO_2 . Une opposition spatiale entre les stations ayant les corrélations les plus élevées et celles ayant les corrélations les plus faibles est visible pour les deux axes : une opposition nord-ouest/sud-est sur l'axe 2 (5% d'inertie) et une opposition sud-ouest/nord-est sur l'axe 3 (4% d'inertie). Les stations avec des coordonnées relativement élevées et positives ont des concentrations élevées durant les jours avec les coordonnées les plus fortes, et inversement, les stations avec des coordonnées les plus basses et négatives ont des concentrations élevées les jours où les coordonnées sont les plus faibles. Par exemple, la station de Melun, fortement représentative de l'axe 2 (coordonnée de 0,46 et une contribution de 15,6) a un taux moyen journalier de $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ les jours avec les coordonnées les plus élevées, et de $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ les jours avec les coordonnées les plus faibles. A l'inverse, la station de Garches, qui a une coordonnée de -0,33 et une contribution de 8,8 sur l'axe 2, a un taux moyen journalier égal à $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ les jours avec les coordonnées les plus élevées, et de $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ les jours avec les coordonnées les plus faibles. Ces résultats ont été mis en relation avec les directions moyennes des vents et les vitesses moyennes de vent pour les 5% des jours avec les coordonnées les plus fortes et les 5% des jours avec les coordonnées les plus faibles sur les deux axes. Les jours des coordonnées relativement élevées et positives sur l'axe 2, les vents provenaient de nord-ouest avec une

vitesse moyenne journalière inférieure à 3 m/s pour les trois quarts des jours (fig. V.9). Ces jours là, les stations avec les concentrations de NO₂ les plus élevées sont situées au sud-est de la région parisienne. Le vent a donc déplacé le NO₂. L'axe 3 montre aussi une opposition qui s'explique aussi par les directions des vents.

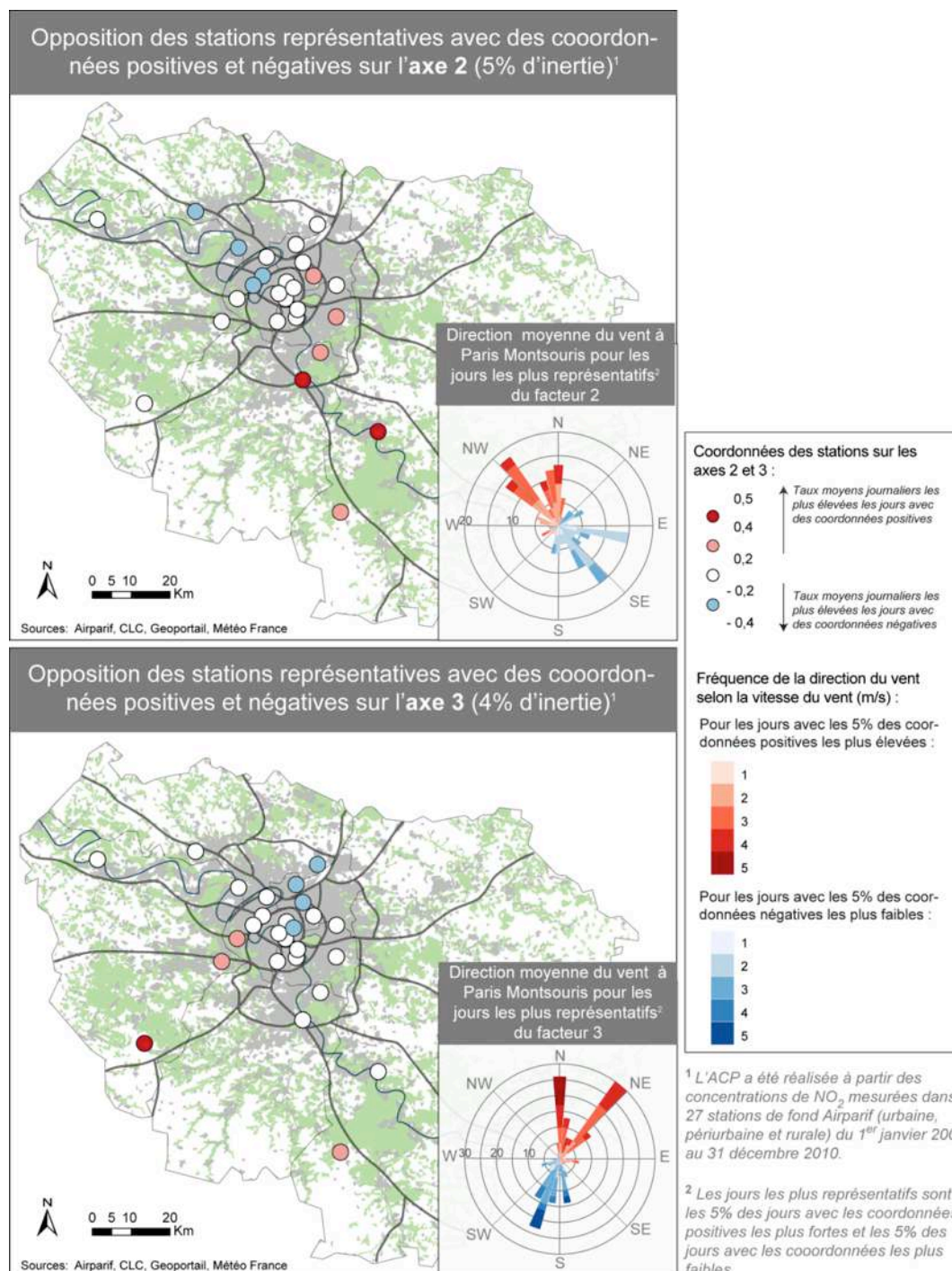


Figure V.9 : Coordonnées des 28 stations de fond et direction du vent moyen à Paris Montsouris les jours avec les coordonnées les plus élevées et les plus faibles sur les axes 2 et 3 ; source des données : Airparif, Météo France

Seuls les résultats de l'ACP sur les NO_2 montrent une variabilité spatiale dépendante de la direction du vent. Pour l' O_3 et les PM_{10} , les variations temporelles semblent assez uniformes dans toute la région parisienne, contrairement aux études réalisées dans d'autres villes (Gramsch *et al.*, 2006; Pires *et al.*, 2008a, b; Lau *et al.*, 2009). Elles dépendent des conditions météorologiques et d'émission, détaillées dans les deux sous-parties suivantes.

V.2.2. Influence des émissions sur la variabilité temporelle des concentrations journalières d' O_3 , NO_2 et PM_{10}

Un cycle temporel dû aux variabilités d'émission (jours ouvrables/week-end) n'est pas mis en évidence sur la figure V.7. La figure V.11 représente le pourcentage des jours de la semaine avec les concentrations journalières les plus faibles (en bleu, 5% des coordonnées de l'axe 1 les plus basses) et des jours de la semaine avec les concentrations journalières les plus élevées (en rouge, 5% des coordonnées de l'axe 1 les plus élevées).

Les taux journaliers d' O_3 sont plus faibles la semaine que le week-end. A l'inverse, les concentrations de PM_{10} et de NO_2 sont beaucoup plus faibles le week-end qu'en semaine. Les activités anthropiques (trafic routier, industrie, travaux, *etc.*) sont plus denses les jours ouvrables, émettant des NO_x et des particules. L' O_3 est plus faible la semaine car les taux de NO sont les plus élevés.

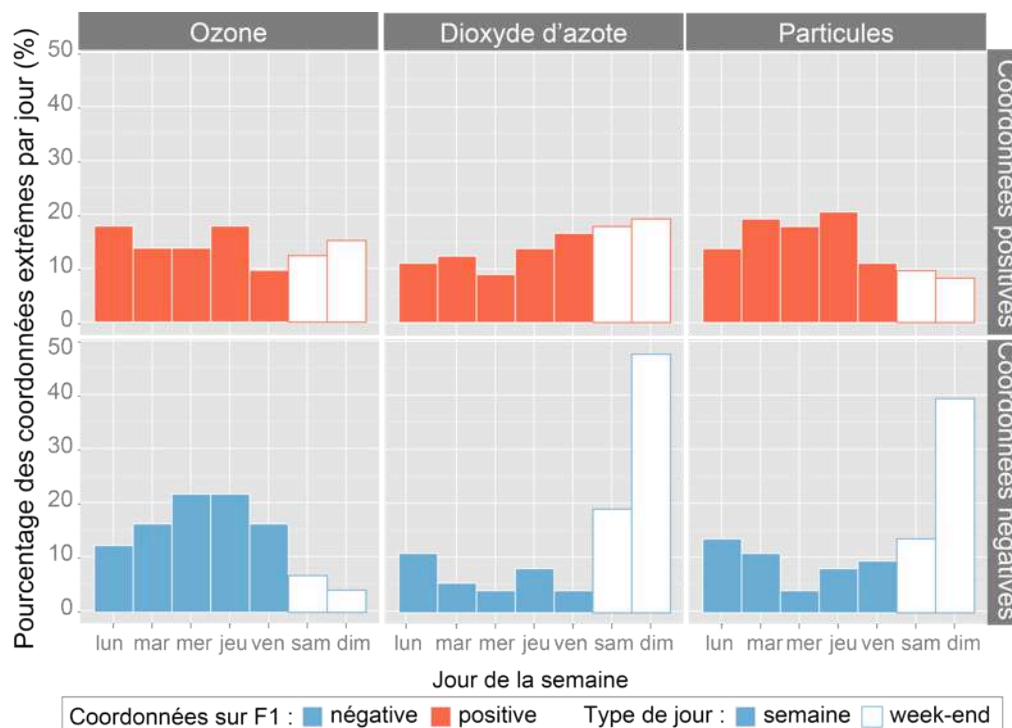


Figure V.10 : Pourcentage des jours de la semaine pour les 5% des coordonnées les plus faibles et les 5% des coordonnées les plus élevées sur l'axe 1 des ACP réalisées sur les taux journaliers moyens d' O_3 , NO_2 et PM_{10} ; source des données : Airparif

Les différences entre les jours sont moins marquées lorsque les concentrations sont plus élevées que lorsqu'elles sont très faibles. Les fortes concentrations d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀ dépendent donc certainement plus des conditions météorologiques que des facteurs d'émission.

V.2.3. Influence des conditions météorologiques sur la variabilité temporelle des taux journaliers d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀

La figure V.7 indique une variabilité temporelle et saisonnière des concentrations journalières d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀. Les jours avec les plus forts taux et les plus faibles taux sont mis en relation avec les facteurs climatiques : analyse des bulletins climatiques journaliers de Météo France ainsi que plusieurs paramètres météorologiques (température moyenne journalière, température minimale journalière, durée d'insolation par jour, radiation globale solaire journalière, direction et la vitesse du vent ; tab. V.1, V.2 et fig. V.11).

Période photochimique de l'O₃

Les concentrations mensuelles d'O₃ sont les plus élevées au printemps et en été (fig. V.7), période durant laquelle la durée du jour est plus longue et l'angle d'incidence du rayonnement solaire plus grand. C'est la période photochimique de l'O₃. Sur le tableau V.1, les jours avec les concentrations d'O₃ les plus fortes sont ceux avec la durée d'insolation journalière et la radiation globale solaire en moyenne les plus élevées. En effet, l'O₃ est formé par réaction photochimique dans l'atmosphère à partir des oxydes d'azote NO_x et des composés organiques volatiles COVs. Un fort rayonnement solaire favorise donc la formation de l'O₃.

	Taux journaliers (µg/m ³)				Température moyenne (°C)				Durée insolation (min)				Radiation globale solaire (J/cm ²)			
	Moy	Max	Min	δ	Moy	Max	Min	δ	Moy	Max	Min	δ	Moy	Max	Min	δ
5% négative	7	11	1	2	4	13	-4	4	165	491	0	181	344	937	77	214
5% positive	84	109	75	9	20	26	10	4	598	889	79	191	2239	3024	1011	467

Les taux journaliers d'O₃ sont calculés pour 27 stations de fond du réseau Airparif.

La température moyenne journalière, la durée d'insolation journalière et la radiation globale solaire journalière ont été mesurées à la station Paris Montsouris de Météo France.

5% négative = 5% des jours avec les coordonnées négatives les plus basses sur l'axe 1.

5% positive = 5% des jours avec les coordonnées positives les plus élevées sur l'axe 1.

Tableau V.1 : Paramètres statistiques décrivant les taux journaliers d'O₃, la température moyenne journalière, la durée d'insolation journalière et la radiation globale journalière pour les jours avec des coordonnées extrêmes sur l'axe 1 ; Source des données : Airparif, Météo France

Cependant, en regardant les minima du tableau V.1, nous pouvons observer que certains jours qui ont un taux d'O₃ relativement élevés ont une durée d'insolation faible : par exemple, 79 minutes d'insolation avec un rayonnement globale solaire de 1290 J/cm² à Paris Montsouris pour un taux journalier de 78 µg/m³ en moyenne pour toutes les stations Airparif, le 7 août

2009. Du 4 au 6 août 2009, le temps est caractérisé par une situation anticyclonique avec un fort ensoleillement, favorisant la formation de l'O₃. Le 6 août 2009, les taux d'ozone sont élevés : 97 µg/m³ en moyenne journalière pour toutes les stations avec une moyenne journalière maximale de 122 µg/m³ pour la station rurale au nord est de Paris (RurNE). Dans la nuit du 6 au 7 août, des basses pressions sont présentes sur l'Île-de-France. Le temps devient nuageux, expliquant la faible durée d'insolation. Cependant, la situation reste assez stable (peu de vent, ni de précipitations), empêchant la dispersion de l'O₃. De plus, le trafic routier étant moins dense au mois d'août (Observatoire des déplacements à Paris, 2009), les émissions de NO sont plus faibles et donc la titration de l'O₃ par le NO est moins importante. L'O₃ peut donc rester présent dans l'atmosphère, engendrant des concentrations relativement fortes alors que l'insolation est faible. La figure V.7 montre que les taux journaliers de NO₂ sont plus faibles en période photochimique, à l'inverse des concentrations journalières d'O₃. Le trafic routier est moins dense, et le NO₂ présent dans l'atmosphère est transformé par photochimie en O₃.

Par ailleurs, nous pouvons observer sur la figure V.7 que les jours avec les concentrations les plus élevées sont rarement isolés mais suivent un ou plusieurs jours avec des taux journaliers qui augmentent. Les épisodes de pollution sont donc le résultat d'un même type de temps (souvent clair et calme) durant plusieurs jours. Ils sont étudiés plus en détail avec des exemples dans le chapitre suivant.

Fortes concentrations de PM₁₀ et de NO₂ durant les temps stables en période hivernale et printanière

La figure V.7 montre des concentrations de PM₁₀ et de NO₂ plus élevées en période hivernale, au début du printemps et plus sporadiquement, à l'automne. Le tableau V.2 indique que les températures minimales journalières sont faibles lorsque les taux journaliers de NO₂ et de PM₁₀ sont les plus forts (2°C en moyenne pour le NO₂ et 4°C en moyenne pour les PM₁₀). Les températures froides favorisent les inversions thermiques qui bloquent les polluants au sol et empêchent leur dispersion verticale. Pour les 5% des jours avec les taux de PM₁₀ et de NO₂ les plus élevés, une inversion thermique a été observée systématiquement sur les radiosondages de Trappes à 00h UTC.

La vitesse du vent moyen journalier mesurée à 10 m à Paris Montsouris est plus faible lorsque les concentrations de NO₂ et de PM₁₀ sont les plus élevées (respectivement, 1,9 m/s et 2,4 m/s en moyenne ; tab. V.2). Cette observation est plus marquée pour les concentrations de NO₂ que pour les PM₁₀ car les maxima journaliers des vents sont égaux à 5,5 m/s lorsque les taux de PM₁₀ sont forts et 5,1 m/s lorsqu'ils sont les plus faibles. Les journées avec les vents les plus faibles sont surtout en période printanière. Une situation anticyclonique stable avec peu ou pas

de vent durant plusieurs jours favorise la stagnation de la pollution. Ce type de situation est présenté dans le chapitre suivant sur les épisodes de pollution.

		Taux journaliers ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Température minimale journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Vent moyen journalier à 10m (m/s)			
		Moy	Max	Min	δ	Moy	Max	Min	δ	Moy	Max	Min	δ
NO ₂	5% négative	16	19	10	2	14	20	7	3	4,0	7,5	1,9	1,2
	5% positive	72	124	61	11	2	15	-9	4	1,9	3,6	0,7	0,6
PM10	5% négative	27	38	21	4	8	20	-3	7	3,0	5,3	1,3	0,9
	5% positive	69	135	55	17	4	15	-9	6	2,4	5,5	0,7	1,0

Les taux journaliers de NO₂ sont calculés pour 28 stations de fond et 3 stations trafic du réseau Airparif.

Les taux journaliers de PM10 sont calculés pour 11 stations de fond et 3 stations trafic du réseau Airparif.

Les températures minimales journalières et le vent moyen journalier ont été mesurés à la station Paris Montsouris de Météo France.

5% négative = 5% des jours avec les coordonnées négatives les plus basses sur l'axe 1.

5% positive = 5% des jours avec les coordonnées positives les plus élevées sur l'axe 1.

Tableau V.2 : Paramètres statistiques décrivant les taux journaliers de NO₂ et de PM10, la température minimale journalière et le vent moyen journalier pour les jours avec des coordonnées extrêmes sur l'axe 1 ; source des données : Airparif, Météo France

Influence du vent sur la dispersion de l'O₃, du NO₂ et des PM10

La figure V.11 présente les directions des vents moyens journaliers mesurées à Paris Montsouris lorsque les taux journaliers d'O₃, de NO₂ et de PM10 sont les plus élevés (en rouge) et les directions des vents lorsque les taux sont les plus faibles (en bleu).

Les jours avec les taux journaliers moyens de PM10 les plus élevés sont lors de situations anticycloniques stables avec un vent provenant principalement de nord et de nord-nord-est. En hiver, lorsque les vents proviennent du nord, les situations synoptiques sont souvent caractérisées par des anticyclones atlantique et continental joints par un col de haute pression (Pédaborde, 1982). Elles entraînent des vents de nord et de nord-est accompagnés de températures souvent froides. La situation anticyclonique et les températures favorisent les inversions thermiques matinales. La direction du vent est beaucoup moins marquée lorsque les taux de NO₂ sont forts.

Les taux de NO₂ et de PM10 sont plus faibles lorsque les vents proviennent du sud-ouest, comme nous pouvons l'observer (fig. V.11). Les vitesses de vent sont souvent supérieures à 4 m/s. Cela témoigne d'une situation dépressionnaire d'ouest, souvent accompagnée de perturbations entraînant la dispersion et la dilution de la pollution.

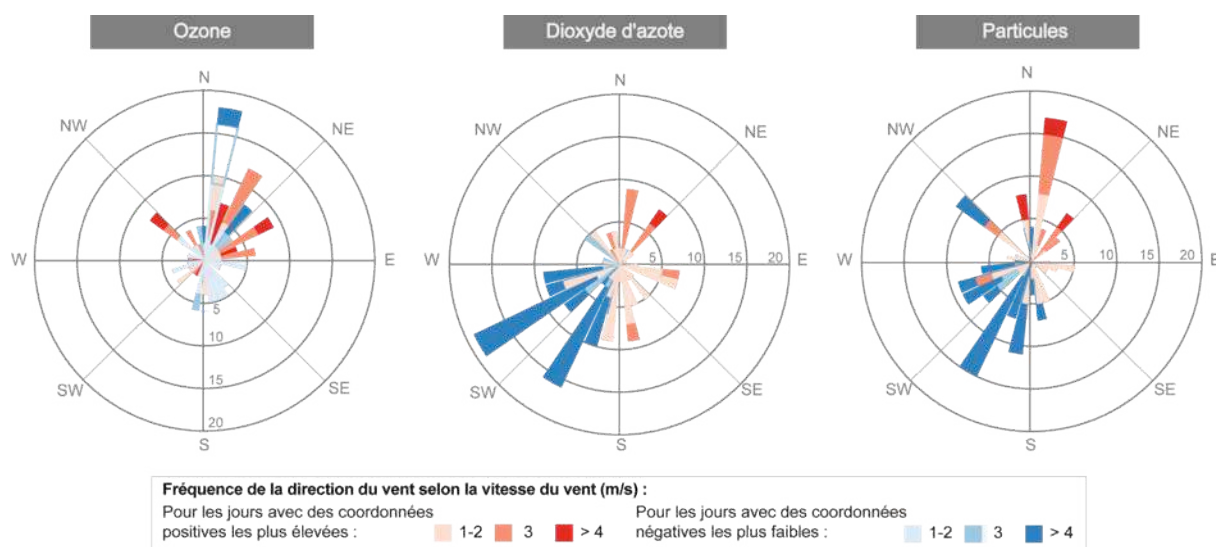


Figure V.11 : Direction et vitesse du vent à Paris Montsouris pour les 5% des coordonnées les plus faibles et les 5% des coordonnées les plus élevées sur l'axe 1 ; *source des données : Météo France*

Les jours avec les concentrations d'O₃ les plus élevées, la direction du vent est moins marquée que pour les taux de PM₁₀. Les vents sont cependant à dominante de nord-est. Cette tendance avait été aussi observée par Olivier Cantat lors des forts îlots de chaleur urbains à Paris (Cantat, 2004). Les concentrations d'O₃ élevées et les forts îlots de chaleur urbains apparaissent en effet majoritairement par temps clair et calme. Ils sont donc observés principalement en période estivale et lorsque les cellules de haute pression se déplacent vers les latitudes moyennes apportant un ciel peu nuageux et peu de vent. Cette situation peut aussi commencer au printemps.

A l'inverse, les taux journaliers d'O₃ sont les plus faibles lorsque le vent est dominant de nord, caractérisant une situation anticyclonique hivernale, période durant laquelle l'insolation est faible, ne permettant pas la photochimie de l'O₃ (fig. V.2).

A l'échelle journalière, les directions du vent font ressortir les situations synoptiques favorables à la formation ou à la concentration de la pollution de l'air. Dans le chapitre suivant, les épisodes de pollution sont détaillés à l'échelle horaire et montre une variabilité spatiale qui peut être dépendante de la direction du vent. A l'échelle horaire, d'autres tendances et cycles peuvent être mis en évidence. Ils sont mis en exergue dans la partie suivante.

V.3. Cycle et variation spatiale des concentrations horaires d'O₃, de NO₂, de PM₁₀ et de PM_{2,5}

Les taux horaires d'O₃, de NO₂, de PM₁₀ et de PM_{2,5} ont été analysés de 2000 à 2012 pour étudier les cycles hebdomadaires et horaires de chaque polluant. Nous avons ensuite cherché à savoir si les polluants variaient spatialement selon les différentes heures de la journée.

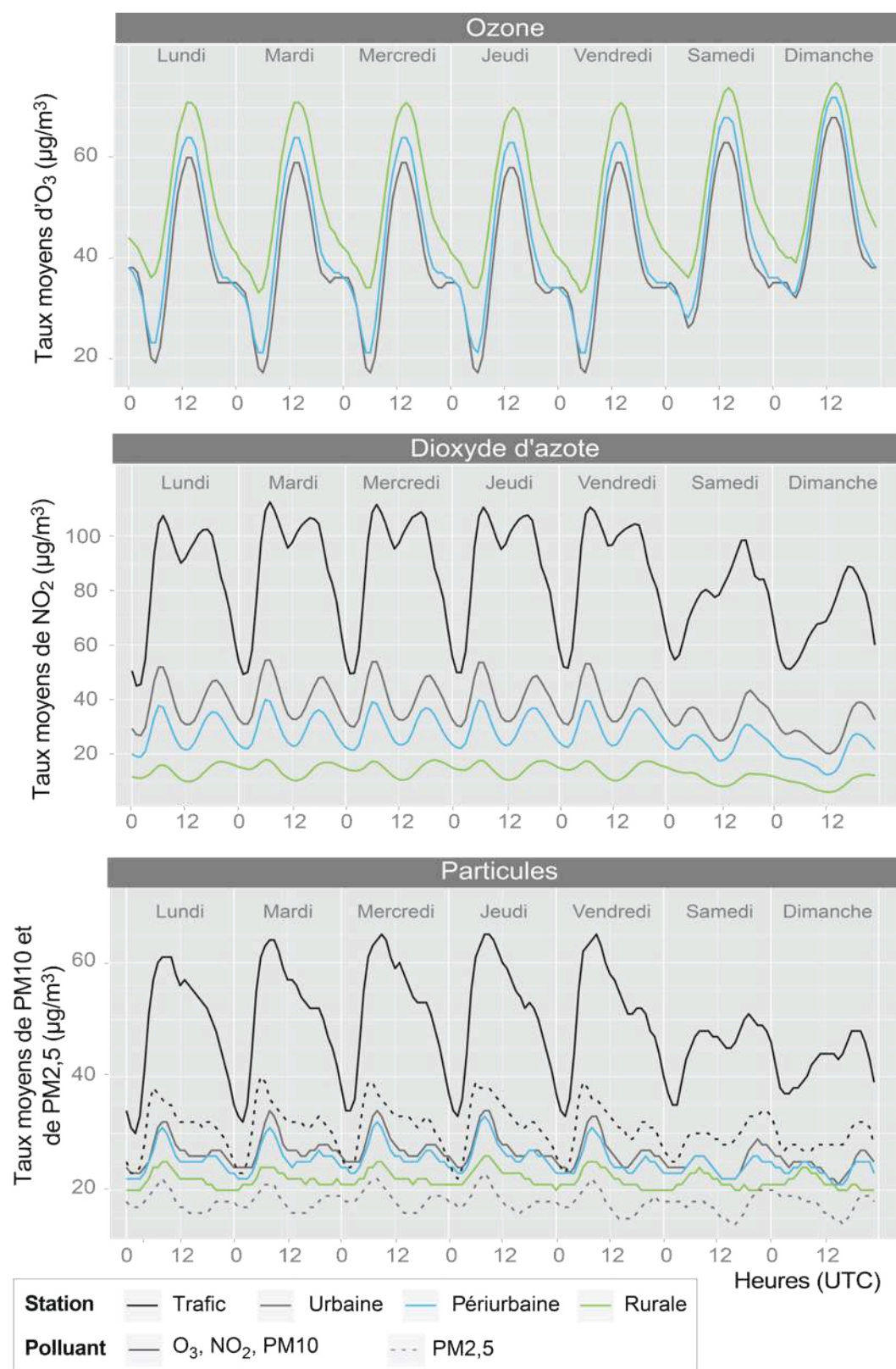
V.3.1. Variabilité horaire selon les sources d'émission et l'insolation

Un cycle hebdomadaire et quotidien se distingue bien sur la figure V.12, dépendant nettement des variations du trafic routier au cours de la journée, particulièrement pour le NO₂. Les jours ouvrables, du lundi au vendredi, les taux sont plus élevés que le samedi et le dimanche. De plus, on observe deux pics de pollution en semaine : entre 7h et 9h, heure légale, et entre 17h et 20h, heure légale (fig. V.13). Le week-end, les pics correspondent aussi aux périodes où le trafic routier est plus dense à Paris. En fin d'après-midi et en soirée le samedi, le maximum correspond aux courses et aux sorties du samedi soir. En fin d'après-midi le dimanche soir, le pic correspond aux retours de week-end (moins étalés que les départs qui ont lieu le vendredi ou le samedi matin).

Les pics des concentrations horaires de PM₁₀ et de PM_{2,5} sont moins marqués durant les heures de pointe. Un pic est observé le matin et une diminution tout au long de la journée. Les sources d'émission des particules sont plus diverses que celles des oxydes d'azote (Airparif, 2009a ; Airparif, 2011b).

Le cycle hebdomadaire de l'O₃ est lui aussi marqué par l'influence du trafic routier : les jours ouvrables, les taux d'O₃ sont en moyenne plus faibles que le week-end, particulièrement en zone urbaine. Les taux d'O₃ moyens journaliers de 2000 à 2012 sont égaux à 38 µg/m³ en semaine et à 45 µg/m³ le week-end, en moyenne dans les stations urbaines. Ce qui s'explique par la titration de l'O₃ par le NO.

Le cycle quotidien de l'O₃ est bien marqué (fig. V.12) : les taux d'O₃ sont plus élevés l'après-midi et relativement stables pendant quelques heures puis décroissent en fin de journée. L'accroissement des taux d'O₃ s'explique d'une part par une insolation plus forte l'après-midi favorisant la photochimie de l'ozone et, d'autre part, par la dynamique de la couche limite qui facilite le brassage de l'air dans la journée. La période de stabilité de l'O₃ dans l'après-midi, appelée « niveau d'équilibre d'ozone journalier » est souvent observée et s'étend ici de 13h à 16h UTC. Les taux les plus faibles sont mesurés entre 4h et 7h UTC, ce qui correspond aux heures où les taux de NO_x sont les plus élevés. De plus, les taux diminuent tout au long de la nuit car la photochimie est impossible la nuit et l'affaissement de la couche limite bloque près du sol l'O₃ qui est détruit au contact du NO.



Les taux moyens annuels sont calculés à partir des données journalières issues des stations Airparif :

- Pour l'O₃ : 8 stations urbaines, 4 stations périurbaines et 6 stations rurales
- pour le NO₂ : 4 stations trafic, 12 stations urbaines, 3 stations périurbaines et 2 stations rurales
- pour les PM10 : 3 stations trafic, 7 stations urbaines, 2 stations périurbaines et 2 stations rurales
- pour les PM2,5 et 1 station trafic et 2 stations urbaines

La méthode de mesure des PM10 et des PM2,5 ayant évolué depuis 2007 et les données non comparables avant et après 2007, les moyennes sont calculées à partir de 2007 pour les particules.

Figure V.12 : Évolution hebdomadaire et journalière des concentrations d'ozone, de dioxyde d'azote de 2000 à 2012 et des taux de particules de 2007 à 2012 ; source des données : Airparif

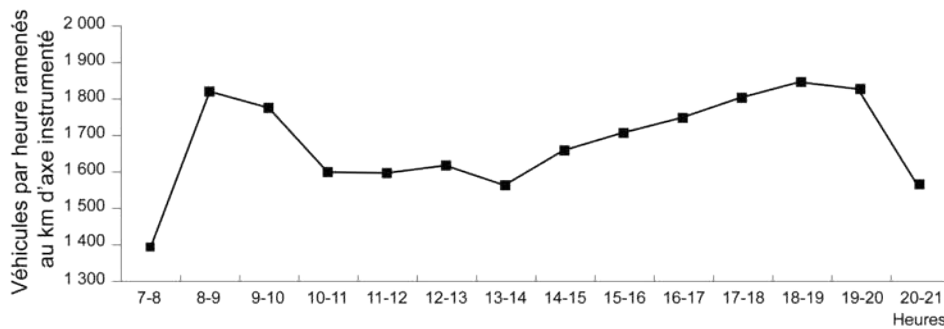


Figure V.13 : Évolution de la circulation automobile au cours d'une journée ouvrable sur le réseau instrumenté en 2008 ; source : *Observatoire des déplacements à Paris, 2009*

V.3.2. Variabilité spatiale similaire en heure de pointe et en heure creuse

Les concentrations horaires de NO_2 et, dans une moindre mesure, de PM_{10} , varient selon les heures pendulaires du trafic routier. Nous avons voulu savoir si la répartition spatiale de la pollution était différente selon les heures de pointe et les heures creuses, ce qui impliquerait que certaines stations sont plus ou moins influencées par le trafic routier. La figure V.14 présente les boîtes de dispersion des taux moyens de NO_2 et de PM_{10} selon les heures de pointe et les heures creuses pour différentes stations de fond et de trafic réparties dans la région parisienne.

Les concentrations mesurées en fond sont plus élevées lors des heures de pointe que durant les heures creuses. La dispersion est plus élevée pour les concentrations de NO_2 que pour les PM_{10} . Cependant, la variabilité spatiale est la même pour les stations de fond quelques soient les heures pendulaires du trafic routier. Cette figure montre aussi que globalement les niveaux de NO_2 et de PM_{10} sont plus élevés dans les stations urbaines que dans les stations rurales. Les stations périurbaines ont des niveaux très proches de certaines stations urbaines, telles que Garches (GAR) et Montgeron (MON). La classification et le choix d'implantation des stations automatiques par rapport à l'éloignement de l'agglomération parisienne peuvent être discutés pour les stations périurbaines.

Au niveau des stations trafic, la station Victor Basch (BAS) a un taux médian de NO_2 plus élevée que les autres stations durant les heures de pointe que durant les heures creuses. Sa variation dépend fortement du trafic routier plus élevé durant les heures de pointe. Les rapports de l'observatoire des déplacements à Paris indiquent clairement une évolution de la circulation automobile selon les heures pendulaires dans Paris (fig. V.14), alors que le trafic routier au niveau du périphérique est beaucoup plus continu tout au long de la journée (Observatoire des déplacements à Paris, 2009). De plus, la morphologie de la place Victor Basch au croisement de plusieurs avenues relativement étroites, bordées de hauts bâtiments empêche la dispersion de la

pollution de l'air. L'influence de la géométrie de la ville sera plus étudiée dans la seconde partie avec les mesures à l'échelle locale.

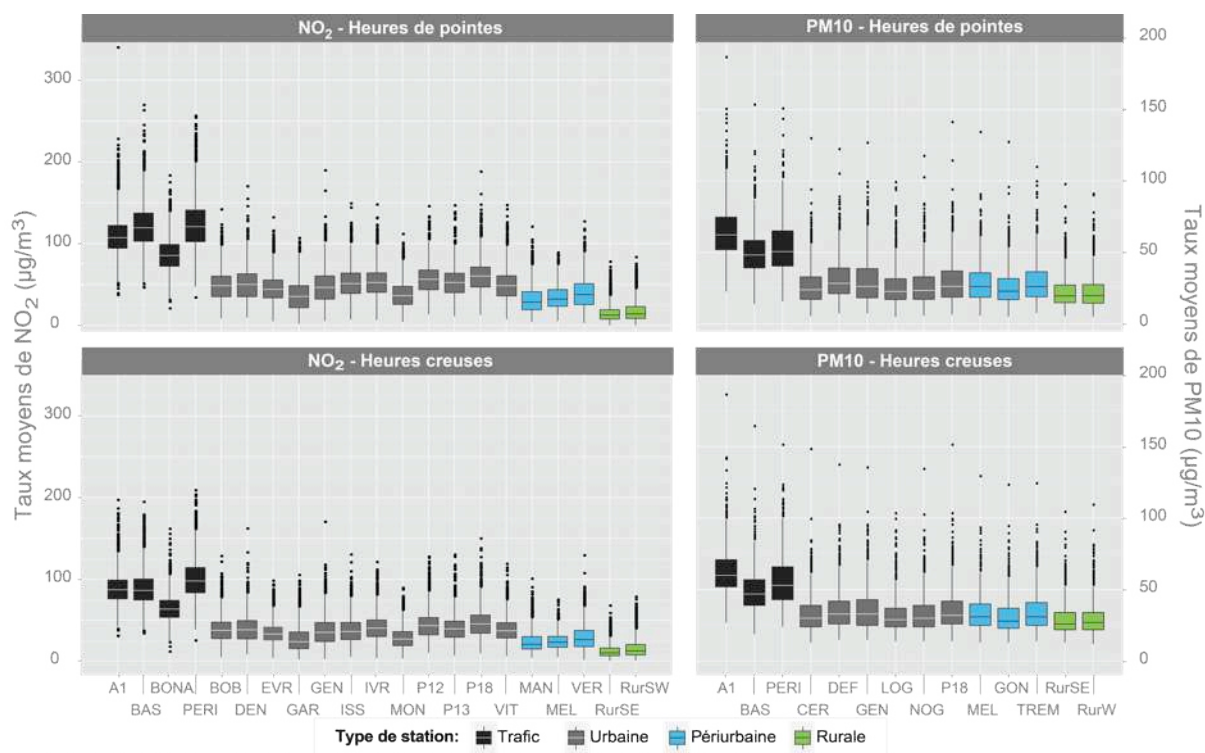


Figure V.14 : Dispersion des concentrations journalières de NO₂ et de PM₁₀ les jours ouvrables durant les heures de pointe et les heures creuses pour les stations trafic et de fond du réseau Airparif de 2000 à 2012 pour les NO₂ et de 2007 à 2012 pour les PM₁₀ ; source des données : Airparif

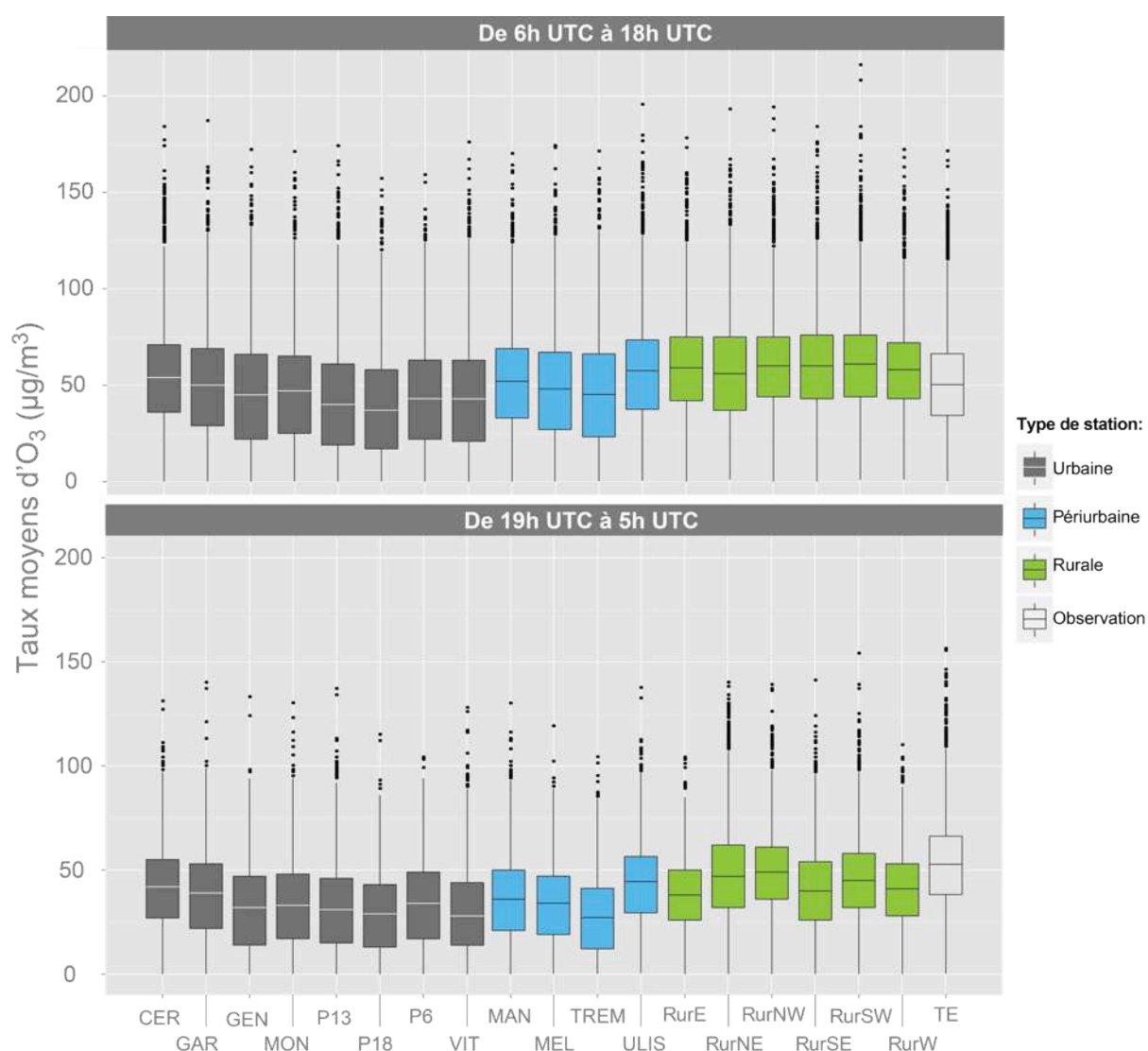
V.3.3. Influence du relief sur la variabilité spatio-temporelle des taux horaires d'O₃

La figure V.15 présente les boîtes de dispersion des taux d'O₃ la nuit et le jour pour différentes stations franciliennes du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2012. Le choix de la distinction jour/nuit a été fait afin de voir l'influence de la couche limite sur les concentrations d'O₃. Le choix des heures pour distinguer entre le jour et la nuit a été fait selon la période photochimique de l'O₃.

La nuit, les différences spatiales entre les concentrations d'ozone sont plus marquées. Les stations proches des émissions de NO ont des taux d'O₃ plus faibles car la formation de l'O₃ par photochimie de l'ozone est impossible et l'O₃ est détruit.

Les stations urbaines et périurbaines, telles que CER, GAR et ULIS, avec des niveaux médians d'O₃ plus élevés la nuit que les autres stations sont situées à des altitudes plus élevées que les autres stations. La station de Cergy (CER) se trouve en effet à 94 m au-dessus du niveau de la mer, celle de Garches à 133 m et celles des Ulis à 165 m. Les autres stations se situent entre 30 m et 71 m. La nuit, lorsque la couche limite va s'affaïsser à cause du refroidissement du sol, l'O₃ va

soit se retrouver piégé près du sol dans la couche limite stable et détruit par le NO, soit se retrouver dans la couche résiduelle. Les stations qui sont plus en hauteur, peuvent se situer au niveau de la couche résiduelle où les concentrations d'O₃ vont se retrouver bloquées (Martin, 2008). La station d'observation d'Airparif, située au 3^{ème} étage de la Tour Eiffel à 300 m, a aussi des taux plus élevés la nuit que les autres stations. La figure V.16 schématise l'évolution de la couche limite. La journée, le 3^{ème} étage de la Tour Eiffel se situe dans la couche de mélange. La nuit, le 3^{ème} étage de la Tour Eiffel peut se trouver au dessus de la couche limite stable. L'O₃ qui est piégé dans cette couche ne sera pas détruit par le NO. Cette figure reste très schématique. La hauteur de la couche limite stable va varier suivant différents facteurs (conditions météorologiques, rugosité sur sol ; Delmas *et al.*, 2005).



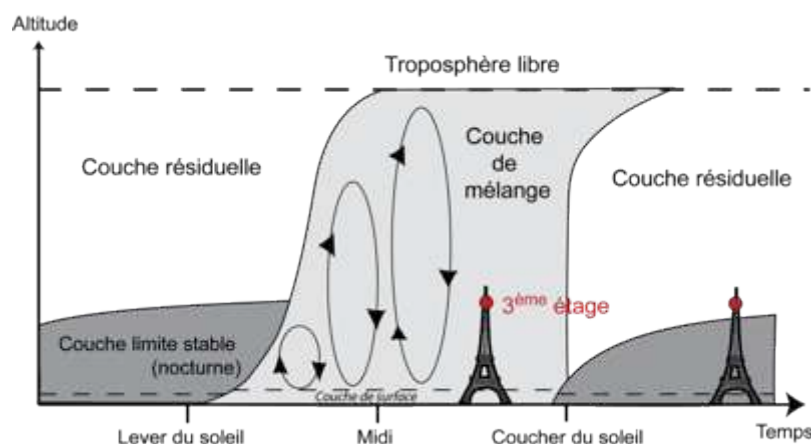


Figure V.16 : Représentation schématique de l'évolution journalière de couche limite atmosphérique sur un sol plat et de la situation de la Tour Eiffel lorsque le 3^{ème} étage a des taux plus élevés la nuit ; *adapté d'après Stull, 1988*

Ce chapitre met en évidence une variabilité saisonnière des polluants. Les concentrations d'O₃ sont plus élevées au printemps et en été lors de situations anticycloniques avec une insolation importante. Les taux de NO₂ et de PM₁₀ sont plus forts l'hiver et au début du printemps lors de situations anticycloniques avec une inversion thermique matinale et peu de vents. Le chapitre suivant focalise sur quelques épisodes de pollution durant ces périodes.



Chapitre VI

Épisodes de pollution à l’ozone, au dioxyde d’azote et aux particules en région parisienne

Les touristes séjournent en moyenne moins de trois nuitées durant leur séjour à Paris (Observatoire économique du tourisme parisien, 2011). Ils sont donc exposés durant leur séjour à la pollution de l’air à court terme et c’est donc lors des épisodes de pollution franciliens qu’ils peuvent être le plus affectés. Durant ces pics, ils peuvent aussi percevoir la pollution de l’air lors de la formation d’un smog. L’objectif de ce chapitre est de présenter les épisodes de pollution typiques et fréquents en région parisienne.

Les épisodes de pollution sont définis et délimités dans un premier temps. La variabilité spatiale et temporelle des épisodes de pollution photochimiques, et des épisodes de pollution hivernaux et printaniers sont présentés dans les deux parties suivantes.

VI.1. Les épisodes de pollution en région parisienne

En Île-de-France, l’arrêté inter-préfectoral du 27 octobre 2011 décrit les conditions et procédures d’information et d’alerte mises en œuvre lors d’un épisode de pollution. Cette procédure s’applique à l’ozone, au dioxyde de soufre, au dioxyde d’azote et aux particules, et elle comporte deux niveaux de gravité croissants : le seuil de recommandation et d’information, et le seuil d’alerte (*cf.* chapitre I). Ces deux seuils sont des valeurs limites horaires pour l’O₃ et le NO₂, et journaliers pour les PM₁₀ afin de limiter les impacts sanitaires d’une population sensible pour le premier et de l’ensemble de la population pour le second.

Le seuil d’information est de 180 µg/m³ en moyenne horaire pour l’ozone, 200 µg/m³ en moyenne horaire pour le NO₂ et 50 µg/m³ en moyenne journalière (de 0h à 24h) pour les PM₁₀. Lorsque ce seuil est dépassé simultanément dans au moins trois stations dont deux de fond pour l’O₃ et les NO₂, et au moins deux stations dont une de fond pour le PM₁₀, une procédure d’information est déclenchée en conseillant d’être vigilant, d’éviter les activités sportives pour les personnes sensibles, et de limiter les émissions en ne prenant pas la voiture par exemple.

L'information est visible sur les panneaux de la Mairie de Paris, diffusée par les médias et sur le site de l'association Airparif. Le seuil d'information et de recommandation est fréquemment dépassé chaque année (fig. VI.1). Le nombre de jours avec un dépassement des PM10 est plus important depuis 2007 car le niveau a été réajusté de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

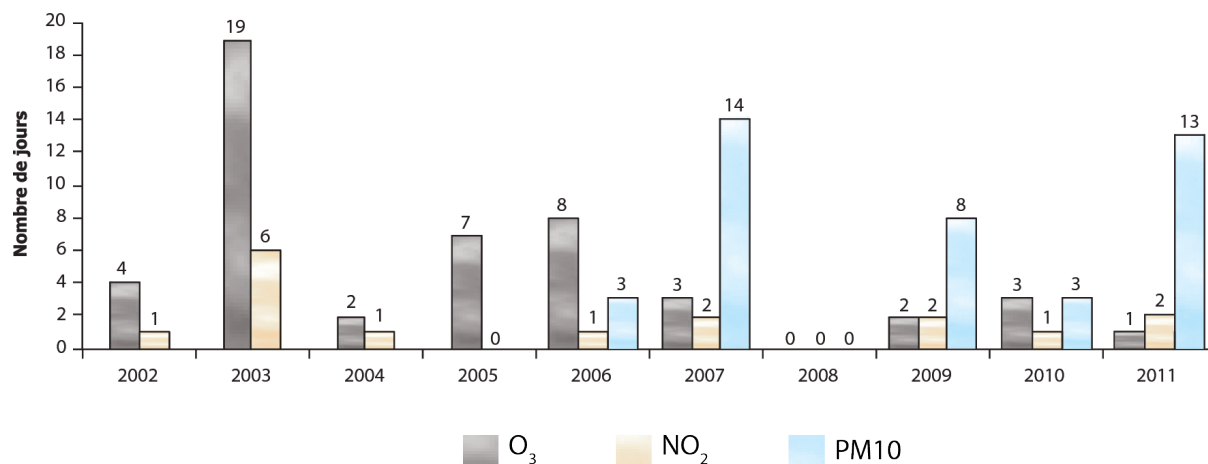


Figure VI.1 : Nombre de jours où le seuil de recommandation et d'information a été dépassé ; source : *Observatoire des déplacements à Paris, 2012*

Le dépassement du seuil d'alerte est exceptionnel et comprend des mesures de restrictions des émissions polluantes en plus de l'information du seuil précédent. Il est de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 en moyenne journalière (de 0h à 24h). Il est de plusieurs niveaux pour le NO₂ et l'O₃ : $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire si la procédure d'information est déclenchée depuis la veille ou $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire pour le NO₂, et $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire, $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant trois heures consécutives ou $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire pour l'O₃. Airparif est chargée de la surveillance et de la détection des épisodes de pollution.

Sans qu'il y ait forcément un dépassement de seuil, un épisode de pollution peut être défini par des niveaux d'O₃, de NO₂ ou de PM10 exceptionnels, et une qualité de l'air dite « médiocre » ou « mauvaise » selon l'indice ATMO ou Citéair (*cf.* chapitre II). D'autant plus que pour les particules, le risque sanitaire n'augmente pas au dépassement d'un seuil mais lors d'un accroissement de ses taux (Affset, 2009). Par ailleurs, les smogs photochimiques et hivernaux sont visibles avec des concentrations d'O₃, de NO₂ ou de PM10 importantes sans forcément dépasser les seuils et peuvent être ressentis comme une nuisance (*cf.* chapitre III).

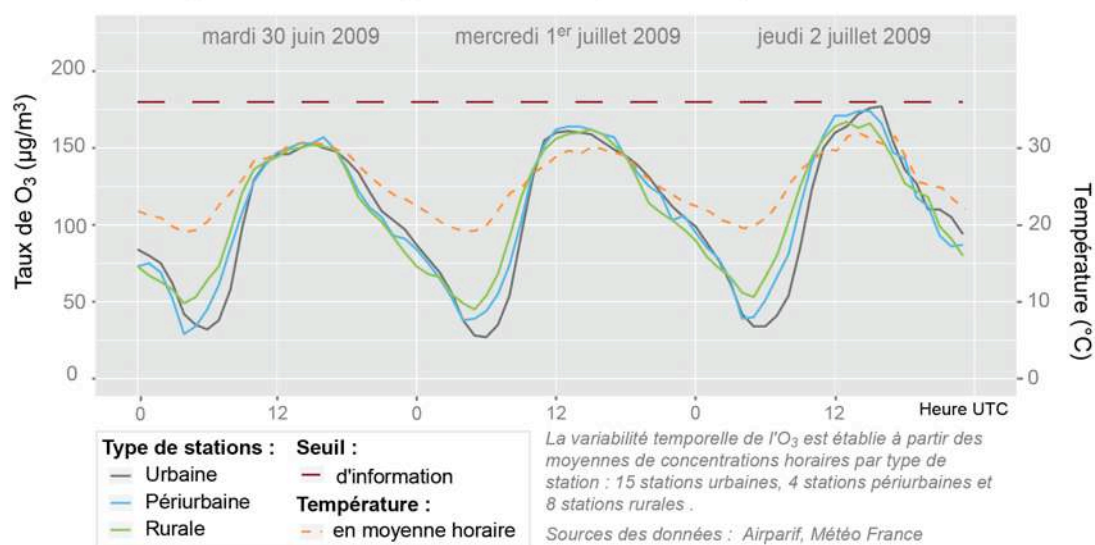
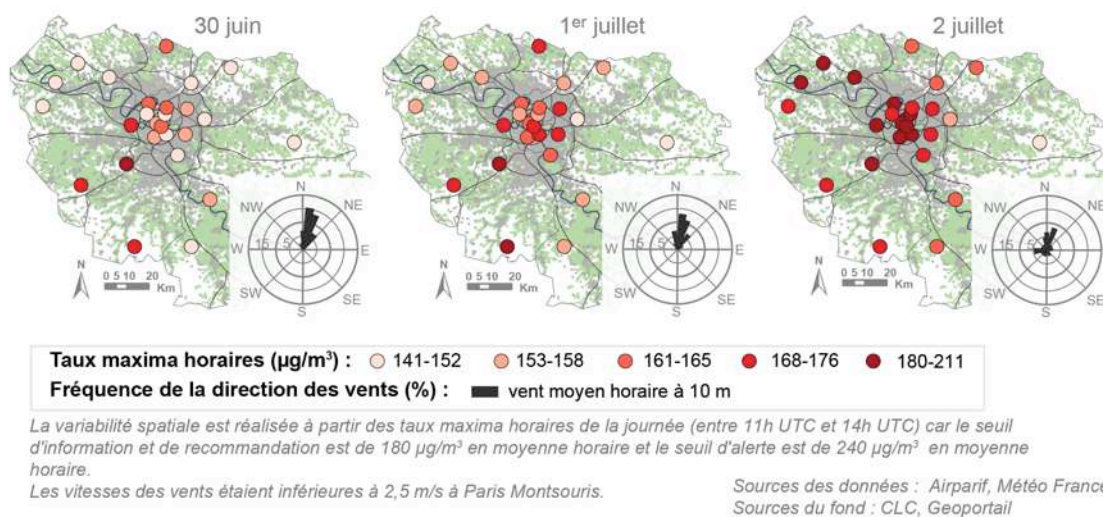
Les deux parties suivantes présentent des épisodes de pollution à l'ozone, et des épisodes de pollution aux particules et dioxyde d'azote.

VI.2. Les épisodes de pollution photochimique

La pollution photochimique est due à la transformation de polluants primaires (NO_x et COV) en polluants secondaires, tel que l' O_3 , sous l'effet du rayonnement solaire. Lorsque le temps est calme avec une forte insolation, les pics de pollution à l' O_3 sont fréquents de mai à septembre. Les épisodes avec des concentrations dépassant les seuils d'information et de recommandation, ainsi que le seuil d'alerte, ne durent pas plus de trois jours en région parisienne. Quelques situations sont cependant exceptionnelles comme la canicule de 2003. Certains épisodes sont plus longs mais avec des taux moins importants, ne dépassant pas les seuils d'alerte (*cf.* épisodes en mai 2008 en annexe A).

Nous avons choisi de présenter deux épisodes de pollution avec des concentrations d' O_3 dépassant le seuil d'information et de recommandation durant lesquels nous avons fait des mesures itinérantes de taux d' O_3 (du 30 juin au 2 juillet 2009) et des enquêtes auprès des touristes (le 27 et 28 juin 2011).

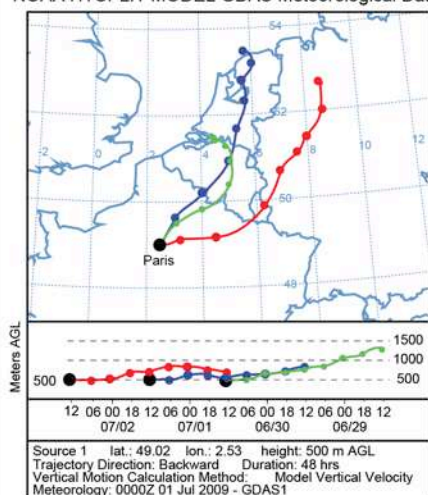
La figure VI.2 présente la variabilité temporelle et spatiale des concentrations d'ozone mesurées par les stations du réseau Airparif du 30 juin au 2 juillet 2009. Cet épisode se démarque par son extension spatiale : un grand nombre de stations a atteint le seuil critique en région parisienne (fig. VI.2 B). Les concentrations sont les plus élevées au sud-ouest le 30 juin et le 1^{er} juillet, s'expliquant par des vents venant du nord-est et inférieurs à 2,5 m/s à Paris Montsouris. Le 30 juin, les taux moyens journaliers avoisinent en moyenne $103,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et la station des Ulis (ULI) dépasse le seuil d'information et de recommandation fixé à $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire (avec un maximum de $208 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le 1^{er} juillet, les concentrations moyennes journalières sont un peu plus élevées (moyenne régionale de $107,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et le seuil critique est dépassé par la station rurale RurS et la station périurbaine des Ulis ULI. Le 2 juillet, les concentrations d' O_3 sont plus élevées en moyenne que les deux autres jours, la procédure d'alerte est déclenchée par Airparif à 16h UTC (18h locales) avec un dépassement du seuil critique par 13 stations (fig. VI.2). Les concentrations sont plus élevées à l'ouest avec des vents quasi-nuls et de direction moins marquée.

A - Variabilité temporelle des taux moyens horaires d'O₃ et de la températureB - Variabilité spatiale des taux maxima horaires d'O₃ et de la direction des vents

C - Rétrotrajectoires de 48h

Trois rétrotrajectoires arrivant le 30 juin, le 1 juillet et le 3 juillet 2009 à 12h UTC

NOAA HYSPLIT MODEL GDAS Meteorological Data



D - Analyse en surface

1er juillet 2009 12h UTC

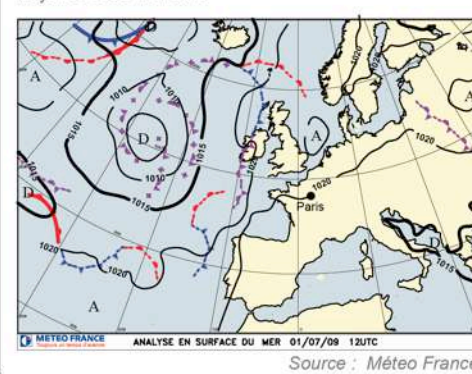


Figure VI.2 : Variabilité spatiale et temporelle des concentrations d'O₃ (A et B) et facteurs météorologiques explicatifs (C et D) du 30 juin au 2 juillet 2009

Durant ces trois jours, la situation est anticyclonique sur la région parisienne avec un ciel clair (indice de nébulosité entre 0 et 2/8), des températures élevées mesurées aux stations Paris-Montsouris et Orly (en moyenne de 24°C à 25°C avec des maximales supérieures à 29°C) et des vitesses de vent faibles (inférieures à 2,5 m/s). Cette situation radiative a favorisé la formation et la stagnation de l'O₃. Les masses d'air provenant du nord-est ont probablement amené de l'ozone depuis l'Allemagne et le Benelux. De même, nous pouvons observer sur la figure VI.2 B que les concentrations étaient plus élevées sur un axe allant du nord est au sud ouest le 30 juin et le 1^{er} juillet. Ce qui s'explique certainement par les trajectoires des masses d'air : le vent provenant de nord et de nord-nord-est a déplacé l'O₃ vers le sud-ouest de l'Île-de-France où les taux sont plus forts.

Les concentrations horaires d'O₃ présentent un cycle quotidien bien marqué dépendant de l'insolation et de la dynamique de la couche limite (fig. VI.2 A). Durant le « niveau d'équilibre d'ozone journalier » de 12h à 16h UTC, les niveaux d'O₃ ne sont pas différents selon les types de station (urbaine, périurbaine et rurale) mais selon leur localisation. La nuit, de 4h à 8h UTC, les taux sont relativement plus élevés en zone rurale que dans les zones urbaine et périurbaine, ce qui s'explique par la densité du trafic routier aux heures matinales de pointe dans l'agglomération parisienne et ses alentours. Le même cycle est observé le 27 juin et le 28 juin 2011 (fig. VI.3).

Le 27 juin et le 28 juin 2011, les concentrations d'O₃ sont exceptionnellement élevées et des dépassements du seuil d'information et de recommandation sont observés entre 14h et 17h dans plusieurs stations franciliennes du réseau Airparif (fig. VI.3). Le 28 juin, la situation est anticyclonique avec des vents faibles (< 3 m/s à Paris Montsouris). Le ciel est nuageux entre 16h et 18h : les concentrations d'O₃ ont diminué dans toutes les stations. Dans la nuit du 27 au 28 juin, des orages ont eu lieu dans la région parisienne entre minuit et 2h du matin, puis entre 6h et 8h du matin dans la région parisienne, lessivant la pollution atmosphérique. Les concentrations d'O₃ à la station rurale rurNW sont plus élevées durant la nuit, laissant supposer qu'il n'y a pas eu d'orages dans cette zone. Les vents sont de nord, l'O₃ non lessivé par les orages a pu ensuite être déplacé vers le sud, expliquant que les concentrations augmentent entre 2 et 4h du matin pour toutes les autres stations. A la fin de la nuit, les niveaux d'O₃ sont compris entre 25 µg/m³ et 100 µg/m³. Ils sont plus élevés que la nuit précédente, expliquant que malgré une insolation plus faible le 28 juin, les maxima atteints vers midi sont similaires à ceux de la veille. Le ciel est nuageux en début d'après-midi empêchant la formation de l'ozone. La vitesse du vent augmente, dispersant la pollution.

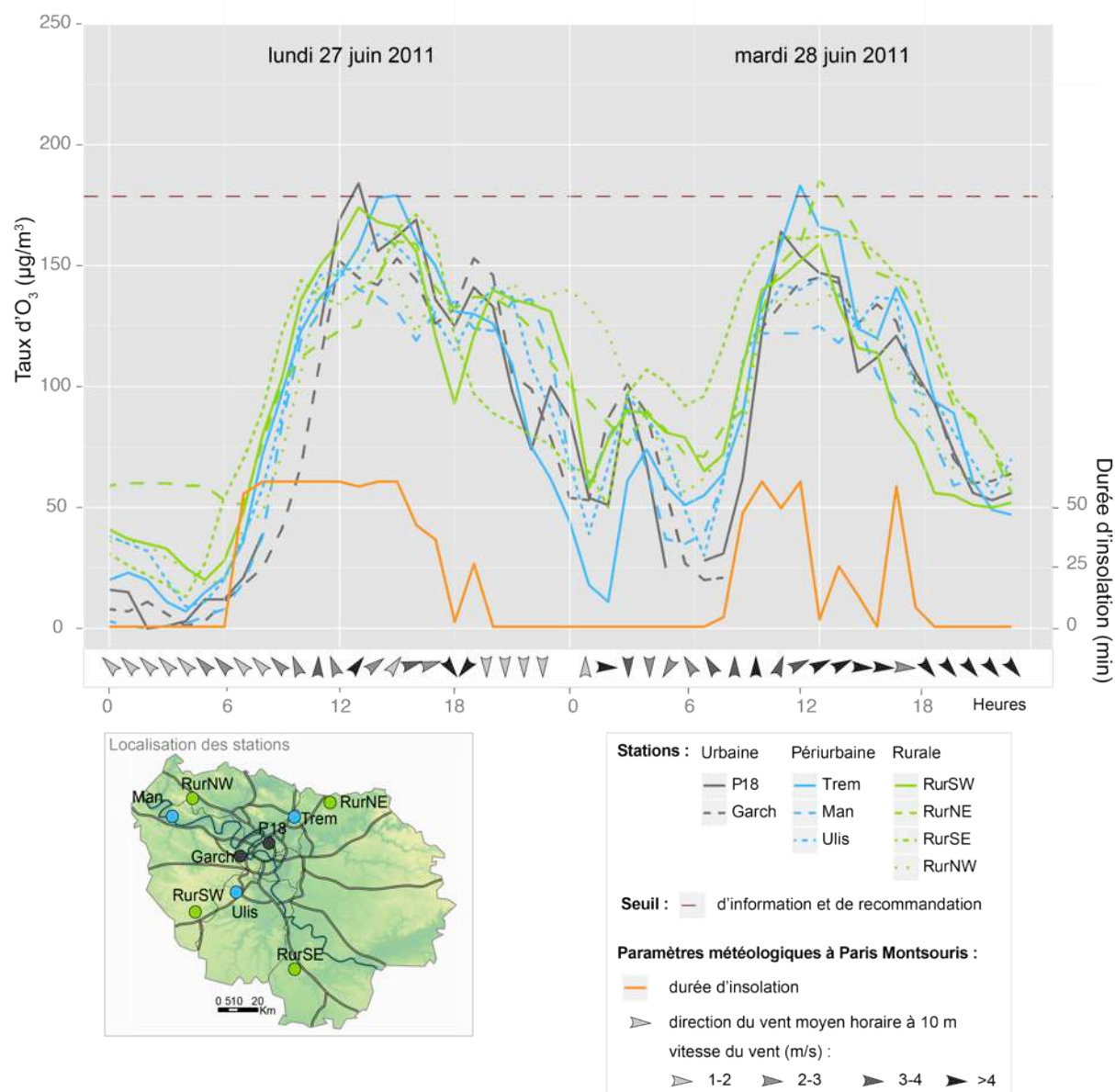


Figure VI.3 : Variabilité temporelle des taux horaires d'O₃ pour différentes stations urbaines, périurbaines et rurales, et des paramètres météorologiques en région parisienne les 27 et 28 juin 2011 ; *source des données : Airparif, Météo France, CGIAR International Research Centers*

Ces deux pics de pollution à l'O₃ étaient en semaine, en dehors des vacances scolaires. Le flux du trafic routier devait être assez important. Les épisodes forts d'O₃ s'expliquent donc essentiellement par les conditions météorologiques en région parisienne.

Durant ces deux épisodes, le smog était visible, limitant la visibilité comme nous pouvons le voir sur la photographie ci-dessous prise du deuxième étage de la Tour Eiffel le 29 juin à 18h40 avec une vue sur la Défense (fig. VI.4).



Figure VI.4 : Photographie prise du deuxième étage de la Tour Eiffel le 29 juin 2009 à 18h40

Les 30 juin et 1^{er} juillet 2009, des mesures de concentrations d'O₃ ont été faites sur différents sites touristiques parisiens durant le « niveau d'équilibre de l'O₃ » afin d'étudier la variabilité à une échelle spatiale et temporelle plus fine. Les 27 et 28 juin 2011, nous avons fait des mesures de terrain sur les sites de la Tour Eiffel, de Notre-Dame et du Sacré Cœur afin de savoir si les touristes percevaient cet épisode de pollution.

VI.3. Les épisodes de pollution hivernaux et printaniers

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les taux de PM₁₀ sont généralement plus élevés durant les situations anticycloniques hivernales ou du début du printemps. Des épisodes de pollution sont fréquents durant quelques jours consécutifs en hiver ainsi que fin mars et début avril. Les pics de PM₁₀ s'accompagnent souvent de forts taux de NO₂. Nous présentons ici plusieurs périodes avec des épisodes de pollution : du 20 décembre au 24 décembre 2007, avec des pics de PM₁₀ et NO₂ particulièrement intenses et longs, et du 10 mars au 7 avril 2011, jours pendant lesquels une série d'épisodes de pollution ont eu lieu.

VI.3.1. Les épisodes de pollution hivernaux

Du 20 décembre au 24 décembre 2007, les concentrations de PM₁₀ et de NO₂ sont particulièrement élevées. La figure VI.5 présente les concentrations moyennes journalières de PM₁₀ et des maxima horaires journaliers de NO₂ pour plusieurs stations réparties dans toute l'Île-de-France du 20 au 24 décembre 2007. Les concentrations moyennes journalières de PM₁₀ dépassent le seuil d'information et de recommandation fixé à 50 µg/m³ tous les jours et dans toutes les stations franciliennes. Le seuil d'alerte fixé à 80 µg/m³ en moyenne journalière pour

les PM₁₀ est dépassé dans toutes les stations, les 23 et 24 décembre, et tous les jours dans les stations trafic. Le seuil d'information et de recommandation fixé à 200 µg/m³ pour les NO₂ en maxima horaire a aussi été dépassé dans les stations trafic du 21 au 23 décembre, et dans quelques stations urbaines le 23 décembre (Paris 18^{ème} P18 et Montgeron MON).

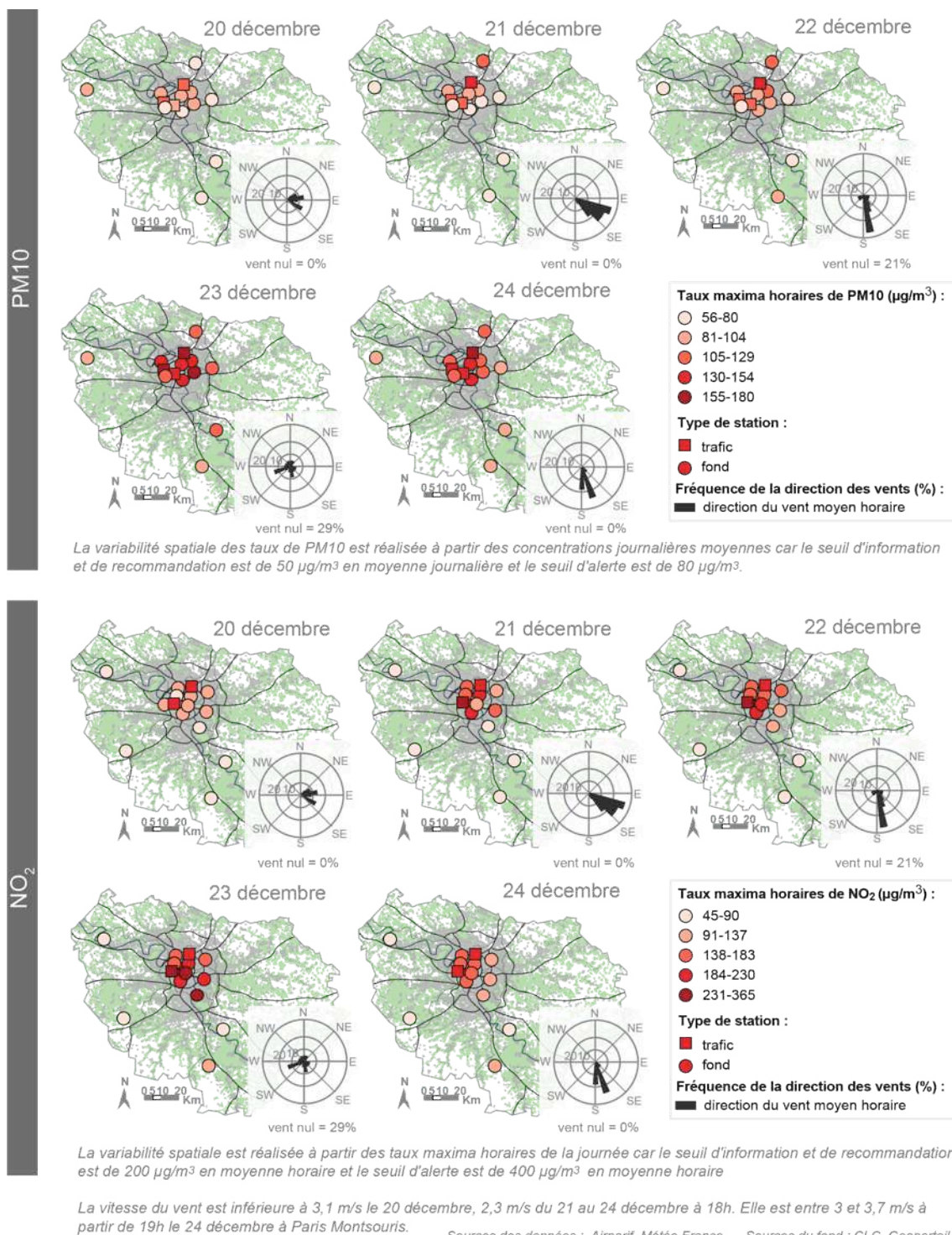
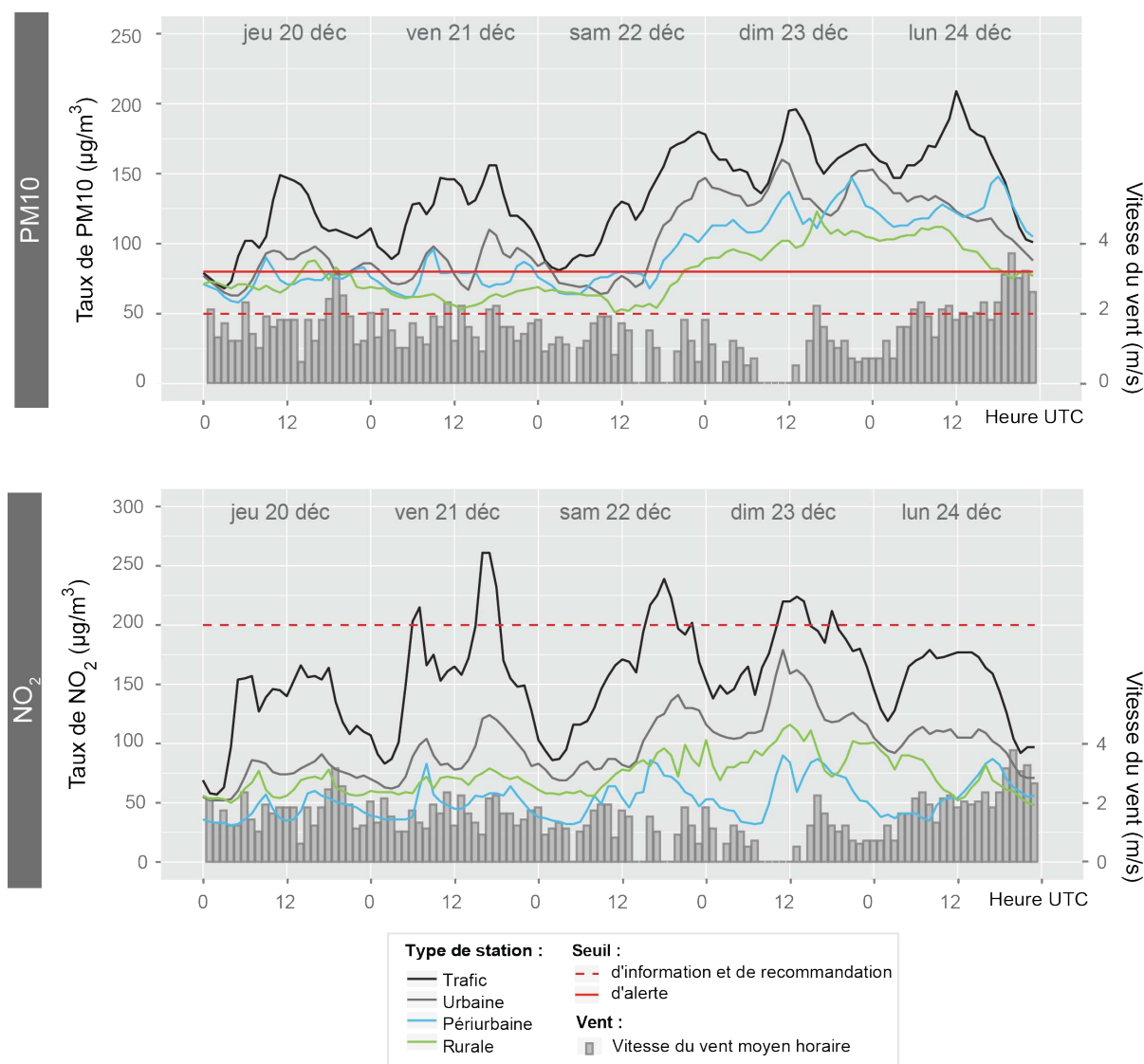


Figure VI.5: Variabilité spatiale des concentrations journalières de PM₁₀ et des maxima de NO₂, et direction du vent moyen horaire du 20 au 24 décembre 2007

Durant ces cinq jours, la situation en région parisienne est sous l'influence d'un anticyclone centré sur l'Europe de l'Est (*cf.* Annexe B). Les vents à Paris sont faibles avec une vitesse inférieure à 2,3 m/s du 21 au 24 décembre à 18h (fig. VI.6). Elle augmente légèrement le 24 en fin de journée (autour de 3 m/s). Le 21 et le 22 décembre, le vent était principalement de sud-ouest et de sud déplaçant la pollution de l'air vers le nord de la région parisienne où les taux mesurés sont plus élevés. Malgré des masses d'air provenant du sud-ouest, les températures sont relativement basses (entre -2,2°C et 7,7°C) du 20 au 24 décembre 2007, et des inversions thermiques sont observées tous les jours. Le temps calme, sec et froid bloque la pollution vers le sol et empêche sa dispersion verticale durant cette période. Ce type de temps et de circulation avec une situation anticyclonique centrée sur l'Europe de l'Est et des masses d'air provenant du sud et du sud-ouest sont fréquents lors des épisodes hivernaux en décembre et janvier. Le 10 et le 11 janvier 2009, une situation similaire a été observée avec des taux de PM₁₀ très élevés (*cf.* annexe C). Dans le chapitre V, nous avons vu à *contrario* que les taux de PM₁₀ étaient les plus élevés lorsque les vents venaient du nord, amenant de l'air froid. Cette situation est plus classique pour les épisodes de pollution à la fin de l'hiver ou au début du printemps.

La figure VI.6 présente la variabilité temporelle des taux moyens horaires de PM₁₀ et de NO₂. Elle montre des variations avec un cycle journalier bien marqué selon les émissions du trafic routier et des autres sources pour les PM₁₀. Le jeudi et le vendredi, les maxima des taux de PM₁₀ et de NO₂ correspondent aux heures de pointe du trafic routier. Le vendredi soir, les maxima de PM₁₀ et de NO₂ sont plus élevés, correspondant à des heures de départ en vacances et en week-end de fête. Les concentrations sont globalement plus élevées le week-end que la semaine. Le vent est plus faible, voir nul, en fin de matinée le dimanche, empêchant la dispersion de la pollution. Un pic de pollution est observé. Le trafic routier est aussi peut-être plus dense à cause des départs en vacances et des courses de Noël.

Les taux moyens horaires de PM₁₀ et de NO₂ sont fortement corrélés du 20 au 24 décembre 2007 dans les stations trafic et les stations urbaines (respectivement, 0,70 et 0,79). Dans les stations périurbaines et rurales, les corrélations des deux polluants sont beaucoup plus faibles. Par exemple, le coefficient de corrélation entre les taux horaires de PM₁₀ et de NO₂ à la station de Melun (MEL) est de 0,43. Il est de 0,47 à la station rurale de Prunay-le-Temple (RurW). Dans les stations trafic et l'agglomération parisienne, les émissions de PM₁₀ sont principalement dues au trafic routier. En périphérie de l'agglomération et en milieu rural, les $\frac{3}{4}$ des PM₁₀ proviennent des industries, du secteur résidentiel et de l'agriculture (Airparif, 2011b). Les NO_x sont émis quant à eux, essentiellement par le trafic routier dans l'agglomération parisienne ou en milieu rural. Les variations temporelles des taux de NO₂ dépendent essentiellement de la densité du trafic, ce qui est différent pour les PM₁₀.



La variabilité temporelle des PM10 est établie à partir des moyennes de concentrations horaires par type de station : 3 stations trafic, 7 stations urbaines, 2 stations périurbaines et 2 stations rurales.

La variabilité temporelle du NO₂ est établie à partir des moyennes de concentrations horaires par type de station : 3 stations trafic, 10 stations urbaines, 2 stations périurbaines et 2 stations rurales.

Les vitesses moyennes horaires des vents sont issues de la station Paris Montsouris.

Sources des données : Airparif, Météo France

Figure VI.6 : Variation temporelle des concentrations horaires de PM10 et de NO₂ du 20 au 24 décembre 2007

Cet épisode de pollution s'explique donc par des conditions météorologiques (situation anticyclonique avec peu ou pas de vent et des températures froides) défavorables à la dispersion de la pollution de l'air. Les taux moyens horaires de PM10 et de NO₂ présentent une variabilité temporelle fortement dépendante des sources d'émission et du trafic routier. Les niveaux sont les plus élevés dans la journée lorsque les émissions de polluants sont les plus fortes. A l'échelle régionale, les concentrations sont de même plus fortes à proximité du trafic routier mais elles sont aussi dépendantes de la direction du vent.

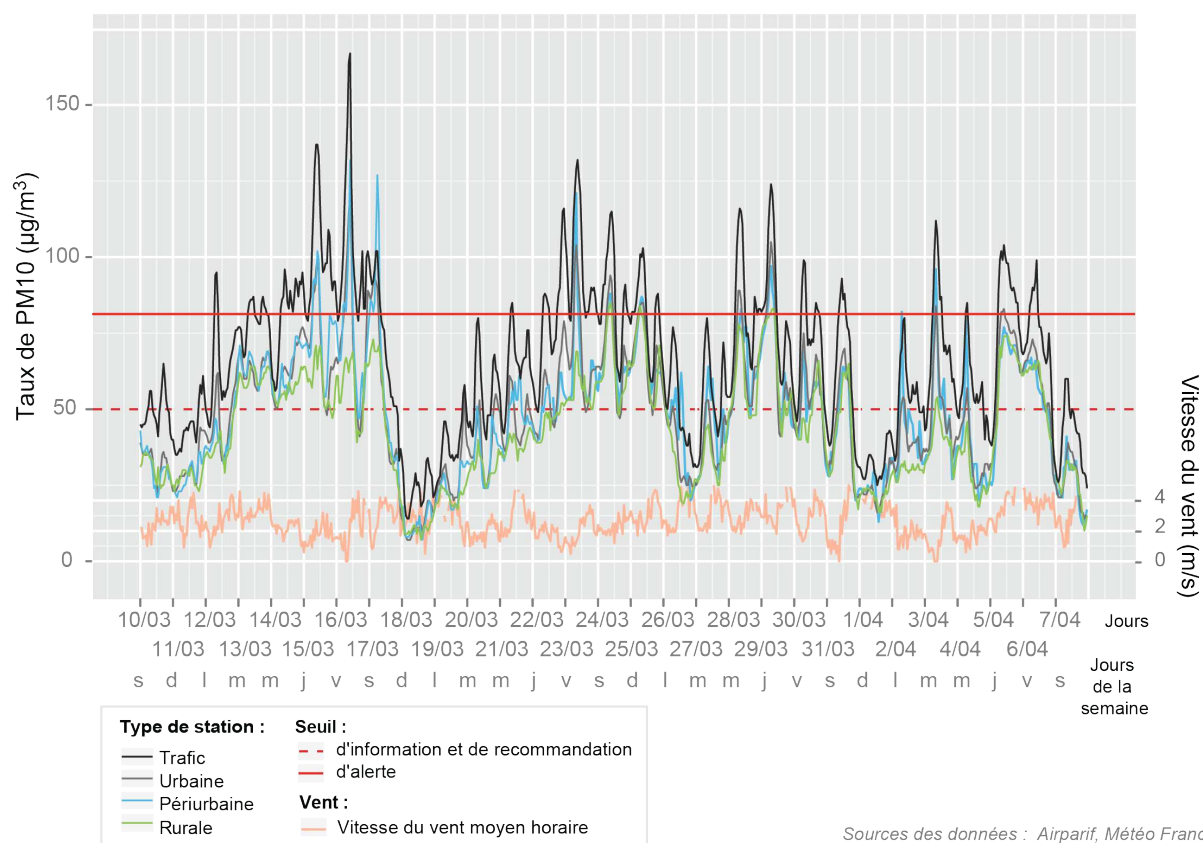
VI.3.2. Les épisodes de pollution de la fin de l'hiver et du début du printemps

Les concentrations de PM₁₀ et de NO₂ augmentent fréquemment durant des situations anticycloniques fin mars et en avril. En 2007, par exemple, les 14, 15 et 16 avril, les seuils d'information et de recommandation, et d'alerte ont été dépassés pour les PM₁₀ (cf. annexe D). Fin mars 2011 et 2013, plusieurs jours avec de forts taux de PM₁₀ ont aussi été observés. Les concentrations sont généralement moins élevées que lors des pics de pollution hivernaux car l'inversion thermique matinale est beaucoup plus faible.

En mars et début avril 2012, plusieurs épisodes de pollution ont été constatés pour les PM₁₀. Les 13 et 14 mars 2012 ainsi que le 30 et le 31 mars 2012, la procédure d'information et de recommandation a été déclenchée avec le dépassement des seuils critiques par toutes les stations trafic et la plupart des stations de fond. Le 5 et le 6 avril, elle a été déclenchée avec des concentrations élevées principalement à proximité du trafic routier. Les taux de NO₂ étaient élevés pendant cette période mais sans dépassement de seuils.

La figure VI.7 présente les variations des concentrations horaires de PM₁₀ en moyenne selon le type de stations. Elle montre une forte variabilité avec des cycles journaliers dépendant des sources d'émission et des niveaux de PM₁₀ résultant des conditions météorologiques qui sont caractérisées par de fortes situations anticycloniques, centrées sur le nord de l'Europe, puis, à la fin du mois de mars, à l'ouest des côtes irlandaises. Au mois de mars, le temps est essentiellement calme et très ensoleillé avec des débuts de matinée souvent brumeux avec une inversion thermique matinale. Quelques exceptions expliquent les taux de PM₁₀ les plus bas. Le 10 et le 11 mars, les concentrations sont plus faibles car une perturbation a traversé la région parisienne, mais sans précipitations. Du 17 au 19 au matin, des précipitations dues à une perturbation ont lessivé la pollution de l'air. Le 31 mars, l'anticyclone, qui apportait un temps calme et sec, se déplace vers l'ouest de l'Irlande. Le 1^{er} et le 2 avril, les vitesses du vent sont plus élevées, dispersant la pollution. Du 3 au 7 avril 2012, les pressions sont plus basses avec une dépression placée sur l'Europe de l'Ouest. Quelques précipitations ont lieu.

Le 5 et le 6 avril 2012, les concentrations de PM₁₀ sont élevées à côté du trafic routier alors que le vent est supérieur à 4 m/s. Par ailleurs, l'écart entre les niveaux de PM₁₀ mesurés dans les stations de fond et dans les stations trafic est plus élevé que les autres jours. Les émissions du trafic routier sont élevées durant ces deux jours. Le vent, relativement fort, disperse la pollution de l'air, expliquant qu'en niveau de fond, les taux soient moins forts.



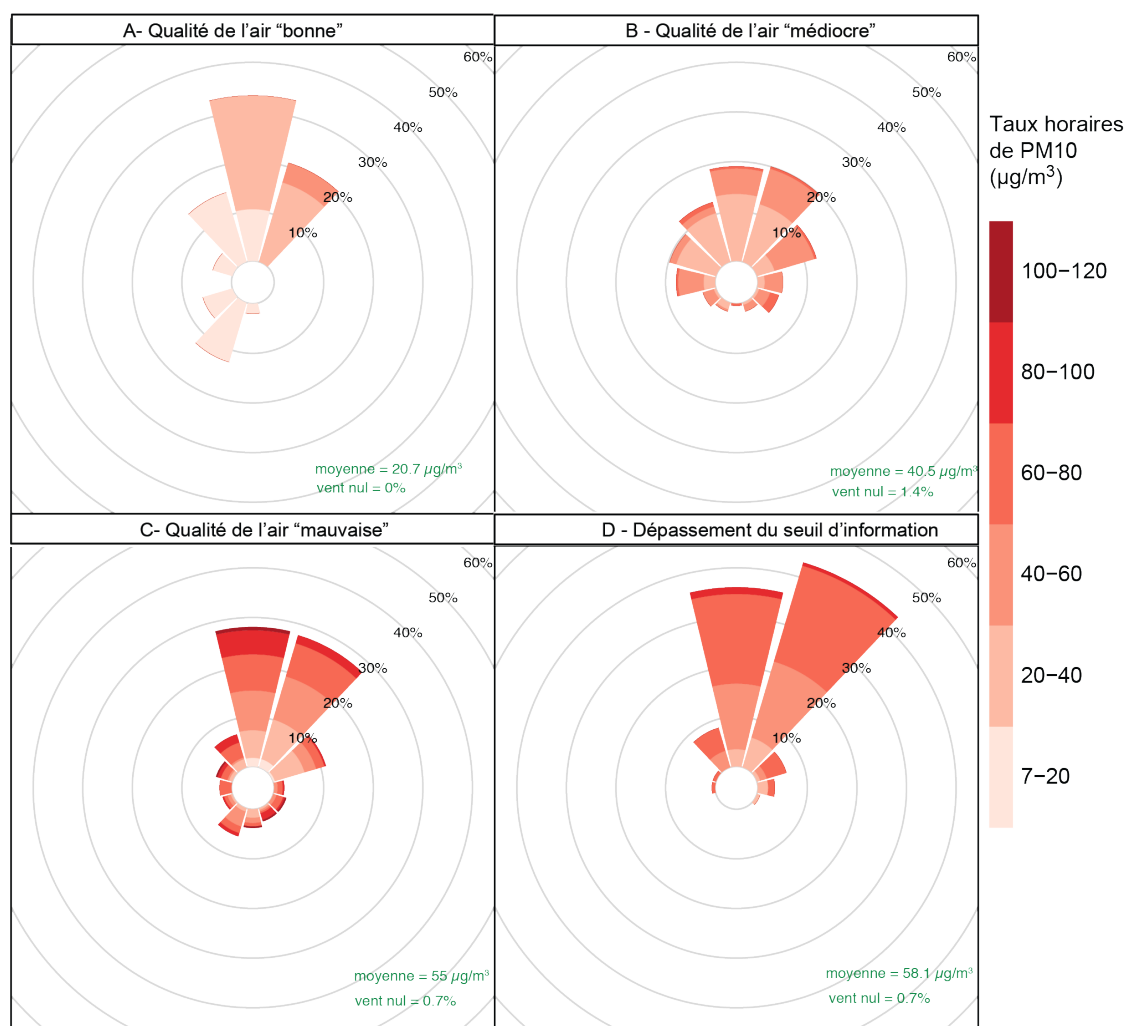
La variabilité temporelle des PM10 est établie à partir des moyennes de concentrations horaires par type de station : 3 stations trafic (A1 BAS, PERI), 7 stations urbaines (BOB, CER, DEF, GEN, LOG, NOG, P18), 2 stations périurbaines (GON, TREM) et 2 stations rurales (RurSE, RurW).

Les vitesses moyennes horaires des vents sont issues de la station Paris Montsouris.

Figure VI.7 : Variation temporelle des concentrations horaires de PM10 du 10 mars au 7 avril 2012

La figure VI.8 présente les fréquences des directions du vent moyen horaire, mesurées à Paris Montsouris, selon la qualité de l'air, et les concentrations horaires de PM10 en moyenne en région parisienne. Nous avons classé les jours selon l'indice Citéair produit par Airparif tous les jours. Quelque soit la qualité de l'air, les vents sont majoritairement de nord et de nord-est. Cette direction est encore plus marquée les jours durant lesquels la qualité de l'air est la plus mauvaise (C et D), amenant de l'air frais et favorisant des inversions thermiques matinales.

Le 17 mars 2012, la qualité de l'air est « mauvaise ». Le vent est principalement de sud-ouest. Les concentrations mesurées dans les stations périurbaines sont plus élevées sur la figure VI.7, dépassant les niveaux à proximité du trafic. Les deux stations périurbaines dont les taux sont présentés ici sont celles de Gonesse GON et de Tremblay-en-France, toutes les deux situées dans le nord-est de la région parisienne. Les taux sont donc plus élevés car les vents ont transporté la pollution de l'air vers le nord est de la région parisienne.



Les taux moyens horaires de PM10 ont été calculés en moyenne sur toutes les stations franciliennes.

La qualité de l'air est dite « bonne » le 11, 18 et le 19 mars. La qualité de l'air est dite « médiocre » le 10, 12, 21, 22 mars et le du 2 au 4 avril. La qualité de l'air est dite « mauvaise » du 15 au 17 mars, du 23 au 29 mars et le 1^{er} avril. Des épisodes de pollution avec le dépassement du seuil d'information et de recommandation ont été constatés le 18 et 19 mars, le 30 et 31 mars, et le 5 et 6 avril.

La direction du vent moyen horaire est issue de la station Paris Montsouris à 10 m.

Figure VI.8 : Fréquence de la direction du vent moyen horaire selon la qualité de l'air et les taux horaires de PM10 du 10 mars au 7 avril 2012 ; source des données : Airparif, Météo France

Durant ces épisodes de pollution, la pollution de l'air était bien visible avec un smog brunâtre limitant la visibilité (fig. VI.9). Nous avons réalisé des mesures de particules en vélo sur des itinéraires touristiques pour étudier la variabilité spatiale à une échelle plus fine, le 20 et le 25 mars 2012.

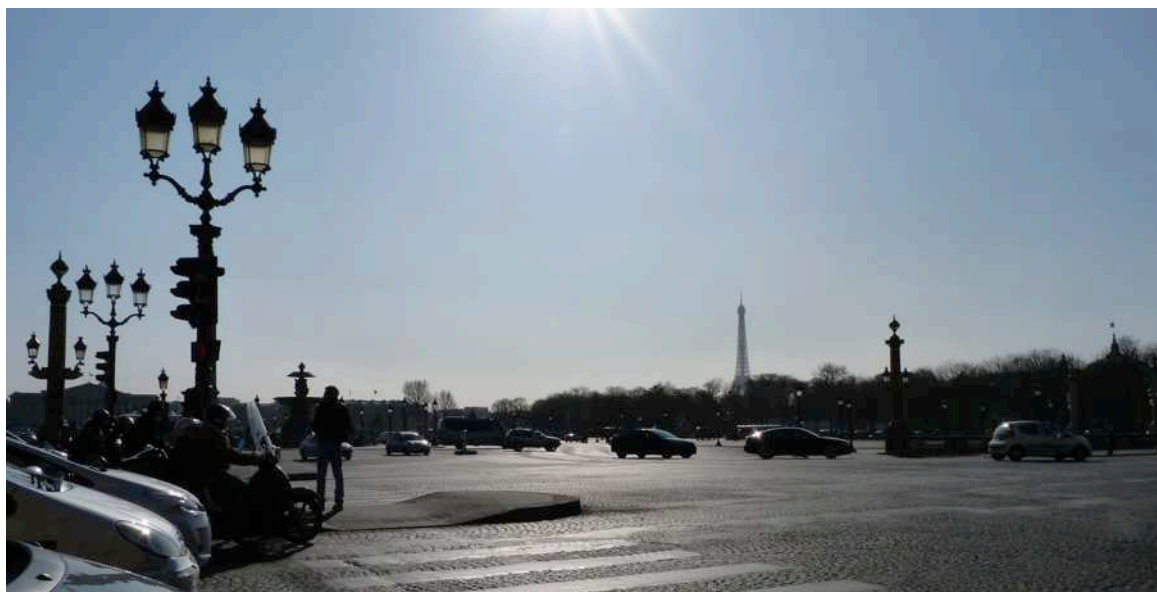


Figure VI.9 : Photographie de la place de la Concorde, le 20 mars 2011 à 15h

Plusieurs types d'épisode de pollution sont fréquents en région parisienne. Au printemps et en été, les pics de pollution à l' O_3 sont dus à un temps calme et ensoleillé. En hiver, les conditions anticycloniques avec un vent faible et des températures froides, avec des inversions thermiques, empêchent la dispersion des particules et du NO_2 entraînant des dépassements de seuils critiques. Au début du printemps, une situation anticyclonique stable entraîne souvent la concentration de la pollution atmosphérique et une augmentation exceptionnelle des taux de particules. La variabilité spatiale à l'échelle régionale des épisodes de pollution dépend de la direction du vent. Pour les polluants primaires, les sources d'émission ont une influence sur la variabilité spatiale et temporelle des épisodes de pollution. Certains de ces épisodes ont été étudiés à une échelle locale à l'aide de mesures de taux d' O_3 et de particules pour caractériser leur variabilité à une échelle plus fine. Les résultats des mesures sont présentés dans la partie suivante.

Conclusion partie II

Cette seconde partie met en évidence des variations temporelles qui permettent d'estimer quand la population et les touristes sont les plus exposés à la pollution de l'air. Les deux tableaux ci-dessous dressent ainsi la liste des polluants problématiques en région parisienne selon deux échelles de temps (journalière et saisonnière) et les mettent en parallèle avec leurs facteurs d'émission et les conditions météorologiques.

Quand, et selon quelles conditions d'émission et météorologiques, les niveaux d'O₃, de PM et de NO₂ sont-ils les plus élevés en région parisienne ?

➡ Variabilité saisonnière

	Polluants problématiques	Conditions météorologiques anticycloniques
Saison photochimique (de mai à septembre)	O ₃	Forte insolation Vent faible (en moy. < 2,5 m/s)
Automne	NO ₂	Vent faible (en moy. < 2 m/s)
Hiver	PM et NO ₂	Inversion thermique Vent faible (en moy. < 2,5 m/s) de sud-ouest ou de nord
Début du printemps (mars-avril)	PM	Inversion thermique Vent faible (en moy. < 2,5 m/s) de nord

➡ Variabilité hebdomadaire et journalière

	Polluants	Conditions d'émission et météorologique
Durant les heures de pointe (7h-9h, 17h-20h)	PM et NO ₂	Trafic routier
Durant la journée	PM	Émission du secteur résidentiel/ tertiaire et industriel
En début d'après-midi ("niveau d'équilibre de l'ozone")	O ₃	Forte insolation Couche limite

Les variabilités spatiales mises en évidence à l'échelle régionale dépendent de la proximité des sources d'émission. Les niveaux de PM10 et de NO₂ sont plus élevés dans l'agglomération parisienne et à proximité du trafic routier, et à l'inverse, les taux d'O₃ sont plus élevés en zone rurale. Durant les épisodes de pollution, le vent faible (>2,5 m/s) déplace la pollution de l'air selon la direction du vent. La variabilité spatiale est étudiée plus en détail à l'échelle locale dans la partie suivante.

Partie III

Variabilité de l'ozone et des particules sur les sites touristiques parisiens



Cette troisième partie présente les mesures des concentrations d'ozone et de particules réalisées dans différents modes de transport et itinéraires touristiques parisiens. Nous avons choisi de ne pas étudier les concentrations de NO_2 car leur variabilité spatiale à une échelle locale est bien établie et montre une variation essentiellement dépendante du trafic routier (Airparif, 2009d).

Le premier chapitre de cette partie décrit le protocole de mesure employé : les capteurs d'ozone et de particules utilisés, les périodes ainsi que les lieux des mesures.

Le second chapitre expose les résultats des mesures des concentrations d'ozone réalisées du 30 juin au 2 juillet 2009 à vélo et à pied sur le site de la Tour Eiffel et des Champs-Élysées.

Le troisième chapitre montre les résultats des mesures de particules réalisées à pied, en bus touristique, en péniche et à vélo sur plusieurs itinéraires touristiques parisiens au printemps et en été entre 2010 et 2012.



Chapitre VII

Protocole de mesure des taux d'ozone et de particules fines sur les sites touristiques parisiens

Nous avons réalisé des mesures de terrain afin d'étudier la variabilité spatiale et temporelle de la pollution de l'air à une échelle spatiale locale, et d'évaluer l'exposition des touristes à l'ozone et aux particules. Ce chapitre présente le protocole de mesure des taux d'ozone et de particules fines, qui s'inscrit dans la lignée de plusieurs autres études sur des mesures de terrain semi-itinérantes (Quénol *et al.*, 2006 ; Dahech, 2007 ; Martin et Carrega, 2009 ; Carrega *et al.*, 2010, Glandus *et al.*, 2011).

VII.1. Analyseurs portables d'ozone et de particules

Les mesures des concentrations d'O₃ et de particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) ont été réalisées à l'aide d'analyseurs portables (2B Technologies Model 205, Dustmate Turkney Instrument). Le faible poids et la taille de ces capteurs nous ont permis de faire des mesures itinérantes. Les analyseurs portables ont fait leur preuve lors d'autres campagnes de mesure et des travaux de recherches (Burley et Ray, 2007 ; Gulliver et Briggs, 2007 ; Kim *et al.*, 2008 ; Martin, 2008 ; Weber *et al.*, 2012).

VII.1.1. Analyseurs d'ozone : 2B Technologies Model 205 et Model 202

Les mesures des concentrations d'ozone ont été réalisées à l'aide de deux modèles d'analyseurs portables d'ozone 2B Technologies : le modèle 205 pour les après-midi du 30 juin et du 1^{er} juillet 2009 (fig. VII.1.). Le modèle 205 a une petite taille (9 x 21 x 29 cm) et un faible poids (2,1 kg) et une alimentation de 12 Volts qui permet aux deux d'être facilement transportables pour des mesures itinérantes. L'ozone est analysé par la méthode d'absorption de rayon UV, comme les stations du réseau Airparif (*cf.* chapitre IV). La version la plus récente de l'analyseur (modèle 205) a deux cellules de détection de l'ozone qui permet d'améliorer la précision, la stabilité de base et le temps de réponse (tab. VII.1).



Figure VII.1 : Analyseur portable 2B Technologie Model 205

	Modèle 205
Précision	0,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Résolution	0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Pas de temps	5s, 10 s, 1 m, 5 m, 1 h

Table VII.1 : Données techniques des capteurs 2B Technologie modèle 202

Les analyseurs d'ozone établissent les taux d'ozone en ppb puis les convertissent en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le modèle 205 a été utilisé lors d'un travail doctoral réalisé par Nicolas Martin, il a montré dans sa thèse que le taux de conversion, utilisé par les analyseurs d'ozone 2B Technologies, est de 2,14 (Martin, 2009). Il correspond à des conditions dites normales, c'est à dire à une température égale à 0°C et une pression de 1013,25 hPa. Or la température ne correspond pas aux températures moyennes observées durant la saison photochimique. Pour cela, l'ensemble des données récoltées a été corrigé en utilisant un taux de conversion égal à 2, défini pour des conditions standard (20°C et 1013,25 hPa).

Les mesures ont toutes été réalisées avec un pas de temps de 10 secondes et complétées d'un relevé manuel régulier des concentrations lors de nos différents itinéraires.

VII.1.2. Analyseur de particules fines: Dustmate Turkney Instrument

Les mesures des taux de particules ont été réalisées à l'aide d'un analyseur portable Turkney Instruments Dustmate mesurant, en dissociant par la méthode de laser néphélomètre, les concentrations en particules de tailles différentes : TSP (Total Particules en Suspension), PM10 (diamètre inférieur à 10 μm), PM2,5 (diamètre inférieur 2,5 μm), PM1 (diamètre inférieur 1 μm). Cette méthode est différente de celle utilisée par le réseau Airparif qui utilise la balance microélectronique TEOM (de l'anglais Tapered Element Oscillating MicroBalance) avec un système de filtre FDMS (Filter Dynamics Measurement System) depuis 2007. Les capteurs disposent d'une colonne déshydratante permettant de supprimer l'humidité que contient l'air absorbé par le capteur et de ne mesurer que les particules fines (Ustache et Favez, 2009). L'analyseur Dustmate de Turkney Instrument, utilisé dans cette étude, n'a pas de colonne déshydratante, ni de tête chauffante, et analyse donc la vapeur d'eau au même titre qu'une

particule solide. Nous verrons dans le choix de nos horaires et jours de mesures que cela a été pris en compte.



Figure VII.2 : Analyseur portable Dustmate Turkey Instrument

	Dustmate Turkey Instrument
Précision	0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Résolution	0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Pas de temps	10 s, 1 m, 5 m, 1 h

Table VII.2 : Données techniques de l'analyseur Dustmate Turkey Instrument

Les concentrations ont été enregistrées avec un pas de temps de 1 minute et comme pour les mesures des taux d'ozone, nous avons complété ces mesures par un relevé manuel des taux de PM10, PM2,5 et de paramètres météorologiques (température, humidité, vitesse du vent).

VII.2. Instruments de mesure complémentaires

Afin de mettre en relation les concentrations d'ozone et de particules observées sur le terrain avec les facteurs météorologiques, de proximité de sources d'émission et de morphologie urbaine, nous avons utilisé des capteurs météorologiques (thermomètre, hygromètre et anémomètre), un GPS et une caméra.

VII.2.1. Capteurs météorologiques

Lors de la campagne de mesure des concentrations d'ozone qui a eu lieu le 30 juin et le 1^{er} juillet 2009, nous avons utilisé un capteur TESTO mesurant la température, l'humidité relative et la vitesse du vent. Les mesures ont été réalisées avec un pas de temps d'une minute et noté régulièrement en même temps que les concentrations d'ozone.

Pour les mesures des taux de PM₁₀, nous avons utilisé un capteur météorologique de marque Kestrel. Nous avons noté régulièrement, en faisant des points GPS, la température, l'humidité et la vitesse du vent.

VII.2.2. GPS et caméra

Un GPS de type Garmin nous a permis de prendre les coordonnées de nos positions toutes les minutes et de marquer nos positions lors des relevés manuels. Une caméra a également été utilisée afin de filmer les itinéraires et de pouvoir visualiser l'intensité du trafic routier et fluvial lors des campagnes de mesure.

VII.3. Itinéraires et moyens de transport

Afin de mesurer l'exposition des touristes aux concentrations d'ozone et de particules, nous avons emprunté plusieurs modes de transport différents : les bus touristiques à deux étages, les navettes fluviales circulant sur la Seine, le vélo et la marche à pied. Les itinéraires empruntaient des sites touristiques parisiens.

VII.3.1. À pied

Nous avons réalisé des mesures des concentrations d'ozone et de particules en marchant. Pour les mesures d'ozone réalisées le 30 juin et 1^{er} juillet 2009, deux transects entre des sites très touristiques ont été retenus : du Champs de Mars à la Tour Eiffel et au Trocadéro ; des Champs Elysées au Jardin des Tuileries (fig. VII.3). Ce choix a aussi été motivé par l'hétérogénéité spatiale des espaces rencontrés : surfaces enherbées ou artificialisées, proximité ou non du trafic routier, etc. Le 30 juin, nous avons mesuré sur un premier transect horizontal Champs de Mars – Tour Eiffel et sur un transect vertical (1^{er} et 2^{ème} étage de la Tour Eiffel) ; le 1^{er} juillet, sur les deux transects étudiés. Les capteurs ont été tenus au niveau des voies respiratoires, à environ 1m65 pour tous les trajets à pied (fig. VII.4).

Nous avons aussi réalisé à pied des mesures de taux de particules, les 28 et 29 juin 2010 (fig. VII.5). Comme pour les mesures des concentrations d'ozone, nous avons choisi un itinéraire hétérogène : l'itinéraire à pied commence par la rue de Rivoli, rue canyon et avec un trafic routier relativement important, puis continue au Louvre et dans le jardin des Tuileries, espace ouvert et loin de la circulation routière.

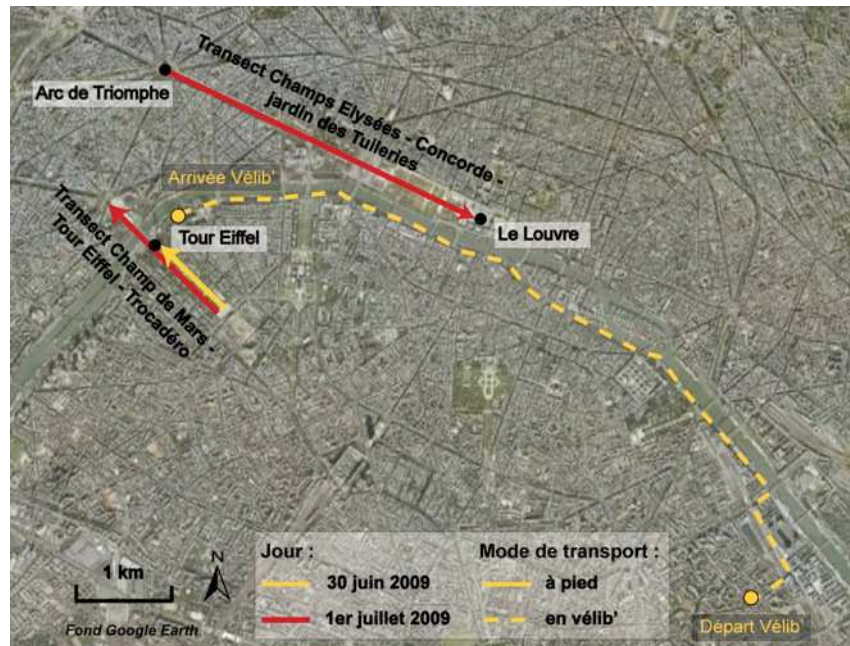


Figure VII.3 : Transects des mesures de concentration d'ozone effectuées le 30 juin et 1^{er} juillet 2009, et itinéraire des mesures en Vélib' du 30 juin 2009



Figure VII.4 : Photographie des hauteurs du capteur d'ozone lors des mesures de terrain du 1^{er} juillet 2009 (à gauche) et du capteur de particule le 29 juin 2010 (à droite)

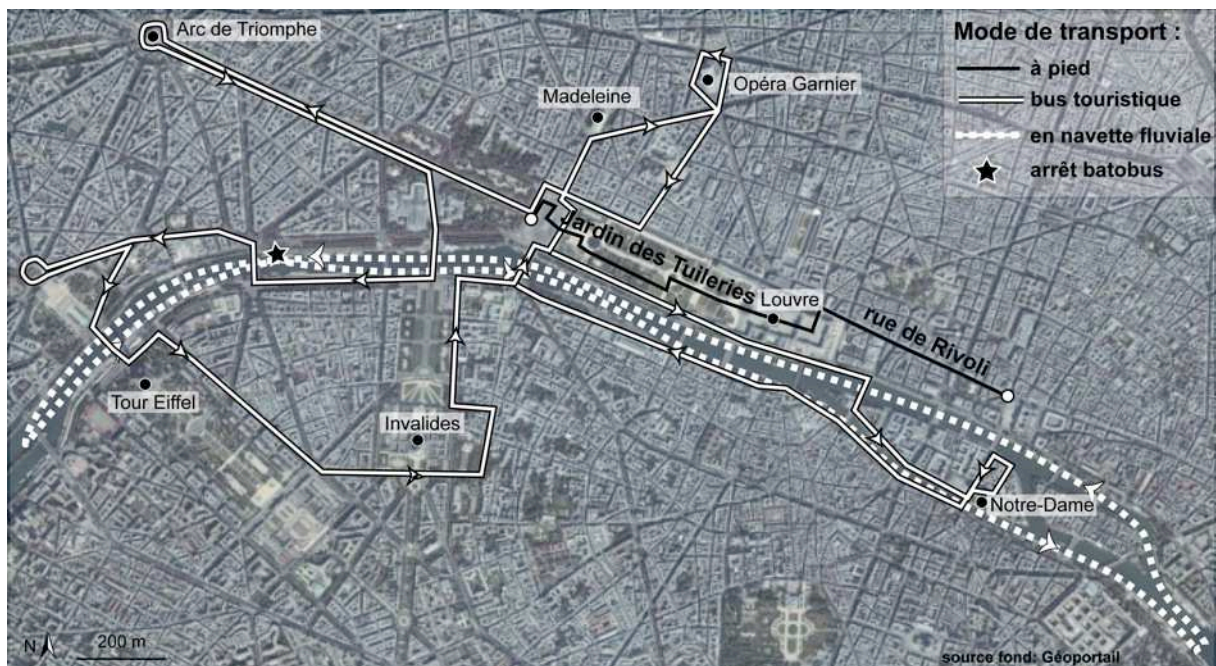


Figure VII.5 : Transects et modes de transport utilisé lors des mesures de concentration de particules

VII.3.2. En vélo

Nous avons mesuré les concentrations d'ozone le long des quais de la Seine, rive gauche, en utilisant un Vélib' (fig. VII.3). Ce trajet relie plusieurs sites touristiques parisiens, de la Bibliothèque François Mitterrand à l'esplanade des Invalides en passant par Notre-Dame ou encore le musée d'Orsay. L'itinéraire choisi est l'un des axes routiers les plus empruntés à Paris. Nous verrons que l'ozone réagit très rapidement au contact des oxydes d'azote émis par les véhicules et que nous n'avons donc pas renouvelé des mesures de concentrations d'ozone à Vélib'. Par ailleurs, il était difficile de placer le capteur au niveau des voies respiratoires, il a donc été placé dans le panier du Vélib' (fig. VII.6).



Figure VII.6 : Photo du capteur d'ozone placé dans le panier du vélo

Nous avons aussi réalisé des mesures des taux de particules les après-midi du mercredi 21 et du lundi 26 mars 2012 à Vélib', durant un épisode de pollution aux particules avec des dépassements du seuil de recommandation et d'information. D'autres mesures à Vélib' ont aussi été faites les dimanches 13 et 27 mai 2012. Les itinéraires empruntés sont relativement similaires à ceux empruntés par les bus touristiques.

VII.3.3. En bus touristique

Nous avons emprunté les bus touristiques à deux étages qui relient différents grands sites touristiques parisiens afin de mesurer les concentrations de particules (fig. VII.5). L'itinéraire emprunté par les bus touristiques avait une morphologie urbaine assez contrastée (rue canyon, large avenue...). Dans le bus touristique, nous étions assis au deuxième étage, à l'extérieur, avec le capteur situé à la même hauteur que la bouche et le nez (fig. VII.7).



Figure VII.7 : Photo de notre emplacement dans les bus touristiques lors des mesures des particules

VIII.3.4. En péniche

Enfin, nous avons emprunté les péniches touristiques qui partent du Pont de l'Alma, et qui longent la Seine du côté rive gauche jusqu'au Pont d'Austerlitz puis font demi-tour pour longer la Seine côté rive Gauche jusqu'à la Tour Eiffel et au pont Bir-Hakeim où elles font un autre demi-tour pour retourner au Pont de l'Alma (fig. VII.5). Nous étions placés au milieu de la péniche, pour éviter les fumées des pots d'échappement de la péniche (fig. VII.8)



Figure VII.8 : Photo de notre emplacement dans les péniches touristiques lors des mesures des particules

VII.4. Jours et horaires des mesures

Afin d'observer une variabilité à échelle fine, les mesures ont été réalisées lors de situation anticyclonique avec peu ou pas de vent (vitesse du vent mesurée sur le terrain inférieure à 3 m/s), et un fort ensoleillement pour les mesures des taux d'ozone. Selon les polluants, la saison et le choix des horaires pour les mesures sont variés.

VII.4.1. En période photochimique et durant le niveau d'équilibre d'ozone journalier

Afin d'avoir des taux montrant une variabilité spatiale, nous avons choisi de faire les mesures durant des journées avec un fort ensoleillement. La campagne de mesure devait donc se situer entre le mois d'avril et de septembre, période photochimique de l'ozone. Nous avons attendu une situation anticyclonique stable qui a eu lieu le 30 juin et 1^{er} juillet 2009.

L'objectif des mesures était de caractériser la variabilité spatiale des concentrations d'ozone sur des sites touristiques parisiens. Pour cela, nous avons réalisé les mesures de terrain lors du niveau d'équilibre d'ozone journalier entre 12h et 16h UTC (fig. VII.9). Les taux d'ozone sont plus élevés l'après-midi et relativement stables pendant quelques heures. Cet accroissement des taux d'ozone s'explique d'une part par une insolation plus forte l'après-midi favorisant la photochimie de l'ozone et, d'autre part, par la dynamique de la couche limite qui facilite le brassage de l'air dans la journée. La période de stabilité de l'ozone dans l'après-midi, appelée « niveau d'équilibre d'ozone journalier », est souvent observée et s'étend ici de 12h à 16h UTC (entre 14h et 18h, heure légale).

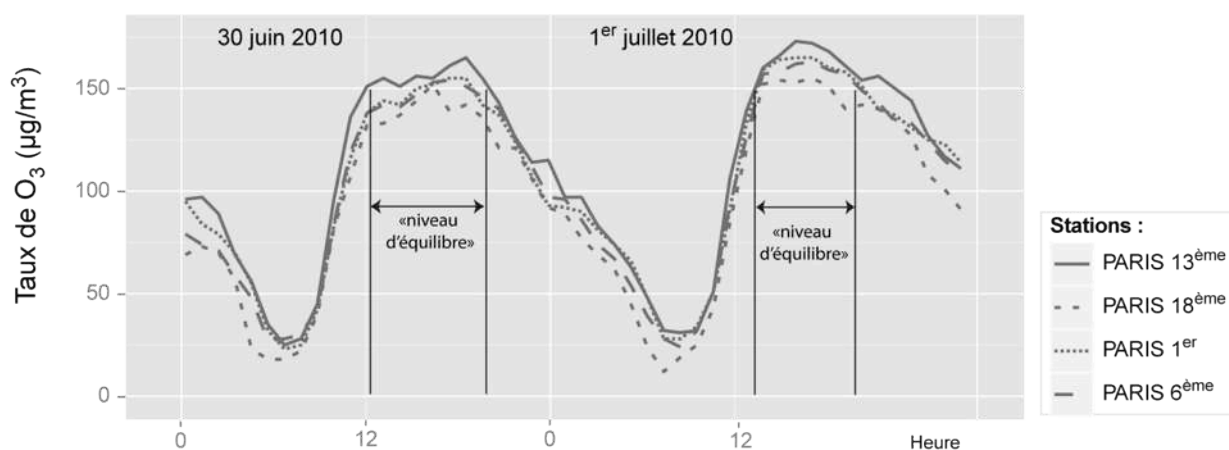


Figure VII.9 : Variabilité des concentrations horaires d'ozone mesurée dans les stations parisiennes du réseau Airparif ; source des données : Airparif*

VII.4.2. Lorsque l'humidité relative est inférieure à 40%

Les premières mesures des concentrations de particules que nous avons réalisées ne prenaient pas en compte le taux d'humidité. La figure VII.10 présente un nuage de points avec en abscisse des données mesurées à la station du 18^{ème} par le réseau Airparif et en ordonnée, des données mesurées par le capteur Dustmate au quatrième étage sur un balcon à Maisons-Alfort, éloignés de toute source d'émission et dans les mêmes conditions que les stations de fond urbaine. Le capteur Dustmate mesurait en continu toutes les 10 secondes. Nous avons ensuite réalisé des moyennes sur une heure, afin d'obtenir des concentrations comparables à celles du réseau Airparif. Ces mesures empiriques et comparatives, réalisées du 19 au 21 mars 2009, ont permis

de mettre en évidence un seuil de 40% au-dessous duquel les taux mesurés avec l'analyseur étaient similaires à ceux mesurés par le réseau Airparif : la corrélation entre les taux mesurés par l'analyseur et ceux mesurés par la station Paris 18^{ème} est égale à 0,88 pour 23 individus. Au-dessus de 40%, la corrélation entre les taux de PM10 mesurés par le capteur Dustmate et ceux mesurés par la station Airparif est significative mais les taux sont supérieurs à courbes $f(x) = x$. Les taux de PM10 et de PM2,5 sont donc jusqu'à 3 fois supérieurs aux concentrations mesurées par Airparif lorsque les taux d'humidité sont élevés (> 60 %). En effet, les particules ont un rôle de noyau de condensation.

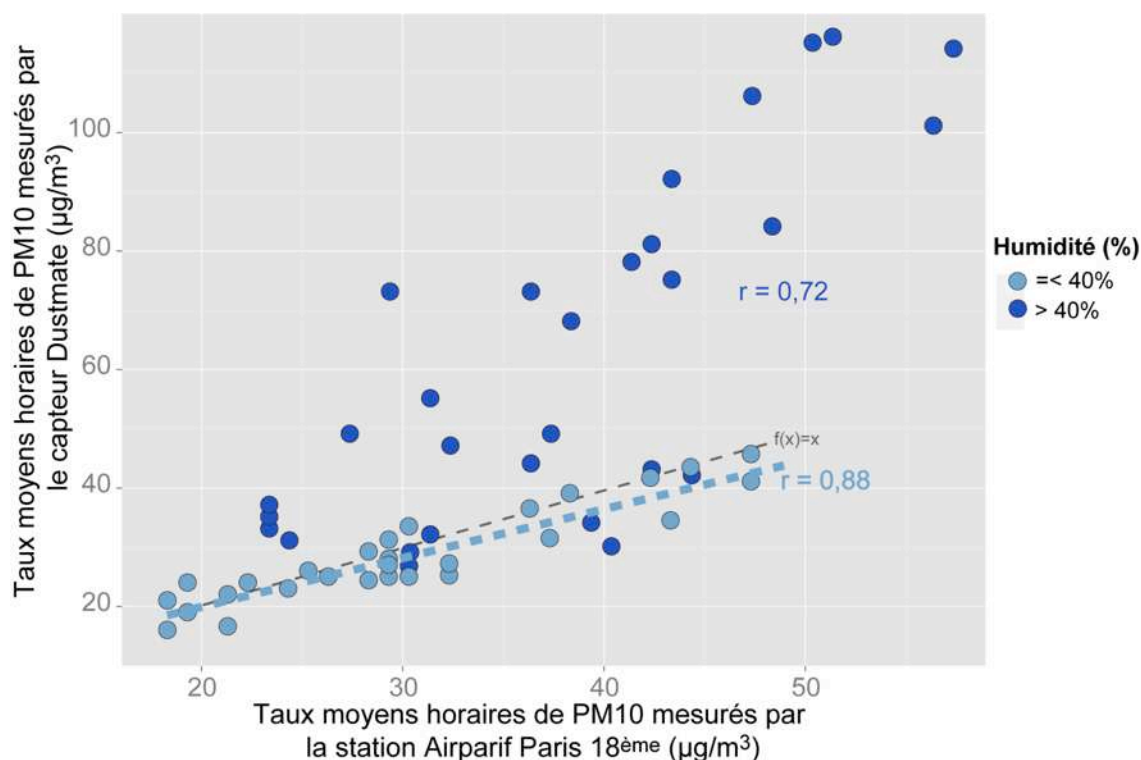


Figure VII.10 : Nuage de points entre les taux de PM10 mesurés à la station Paris 18^{ème} et ceux mesurés par le capteur Dustmate à Maisons-Alfort

Les premières mesures ont été réalisées sans prendre en compte l'humidité relative. Les niveaux mesurés étaient jusqu'à trois fois supérieurs à ceux mesurés par les stations trafic Airparif. Nous avons donc réalisé les mesures durant les jours et les heures avec un taux d'humidité inférieur à 40%, comme nous pouvons le voir sur la figure VII.11.

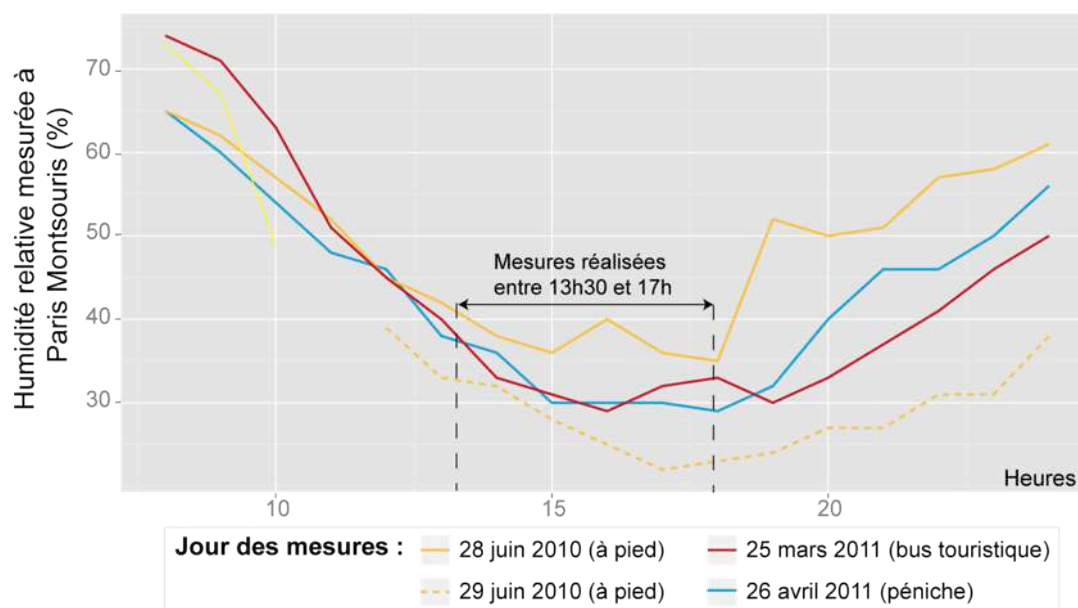


Figure VII.11 : Humidité relative mesurée à Paris Montsouris lors des mesures de terrain et période de ces mesures

Ce protocole de mesure empirique, particulièrement pour les particules, permet de mettre en évidence des premiers éléments de variabilité spatiale à une échelle locale et d'estimer l'exposition des touristes à la pollution de proximité. Les variations des particules et de l'ozone sont présentées dans les deux chapitres suivants.



Chapitre VIII

Exposition des touristes à l’ozone lors d’un épisode de pollution sur des sites touristiques parisiens

Afin d’évaluer l’exposition des touristes à la pollution de l’air en métropole parisienne, des mesures de concentration d’ozone ont été réalisées le 30 juin et le 1^{er} juillet 2009 sur deux transects situés sur des sites touristiques : Champ de Mars - Tour Eiffel - Trocadéro et Champs Elysées - Jardin des Tuileries. Ce chapitre présente les résultats de cette campagne de mesure à une échelle locale, en les replaçant dans un premier temps par rapport niveau de fond de l’ozone en région parisienne.

VIII.1. Influence des conditions météorologiques sur les taux moyens d’ozone mesurés sur le terrain

La figure VIII.1 présente la variabilité des concentrations moyennes horaires mesurées dans plusieurs stations parisiennes du réseau Airparif, ainsi que la moyenne horaire des taux que nous avons mesurés sur le terrain, à l’aide du capteur portable 2B Technologie, les 30 juin et 1^{er} juillet 2009 durant deux journées ensoleillées et chaudes. Les mesures ont été réalisées lors du « niveau d’équilibre » de l’ozone, entre 11h et 17h heure UTC (13h et 19h heure locale à Paris) le 30 juin et entre 11h et 16h heure UTC (13h et 18h heure locale à Paris).

Les mesures, qui ont été réalisées à pied (rond sur la figure VIII.1), sont similaires aux moyennes horaires mesurées dans les stations parisiennes Airparif. A l’échelle horaire, les niveaux moyens mesurés sur le terrain dépendent du niveau de fond de l’ozone. Les taux pour ces deux journées sont relativement forts, comme nous avons pu l’observer sur les panneaux d’information de la mairie de Paris qui indiquaient une qualité de l’air médiocre le 29 juin 2009 (fig. VIII.2). Comme il est vu dans le chapitre VI, un épisode de pollution a eu lieu du 30 juin au 2 juillet 2009 s’expliquant par les conditions météorologiques.

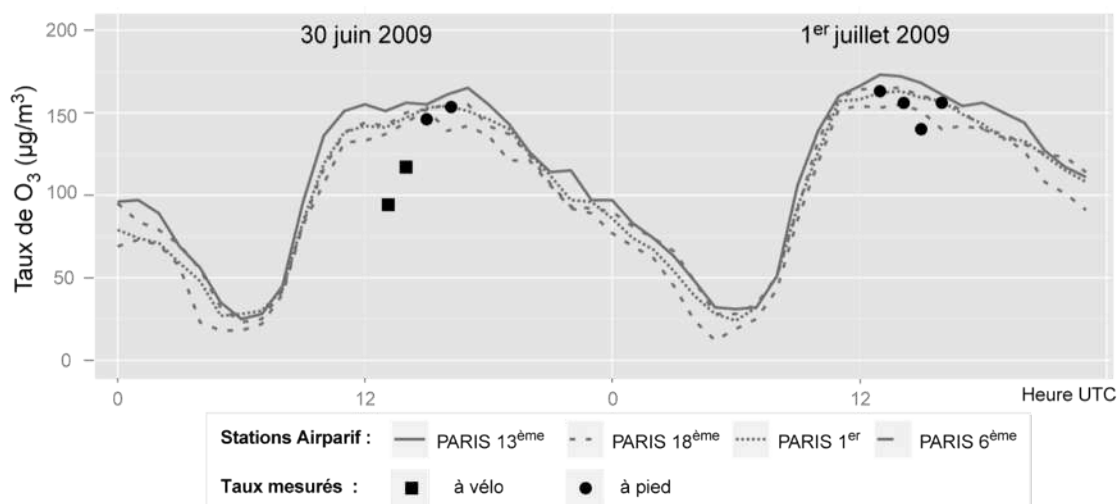


Figure VIII.1 : Taux moyens horaires mesurés aux stations parisiennes de Airparif et avec le capteur d'ozone 2B Technologie, les 30 juin et 1^{er} juillet 2009 ; *source des données : Airparif*



© Malika Madelin

Figure VIII.2 : Panneau de la mairie de Paris avec la qualité de l'air et la température du 30 juin 2009

Par ailleurs, nous pouvons observer sur la figure VIII.1 que les concentrations mesurées en vélo sont inférieures à celles observées à pied et à celle mesurées par les stations Airparif. Lors de notre parcours à vélo, nous étions sur les quais de Seine où la circulation était assez dense et où les émissions d'oxyde d'azote NO étaient donc relativement importantes à proximité du capteur, détruisant l'ozone.

De plus, le 1^{er} juillet, les taux mesurés à 15h UTC sont plus faibles que les autres car nous nous déplaçons du Trocadéro à l'avenue des Champs-Élysées à pied dans le 16^{ème} arrondissement parisien où nous avons emprunté des rues canyon. Malgré la faible intensité du trafic routier, la

largeur et la hauteur des rues ainsi que la faible vitesse du vent (<2 m/s) facilitent la concentration de polluants primaires, dont l’oxyde d’azote qui titrate l’ozone.

VIII.2. Variabilité spatiale des concentrations d’ozone à l’échelle locale

VIII.2.1. Très forte variabilité des concentrations d’ozone en vélo

La figure VIII.3 présente les mesures des taux d’ozone que nous avons réalisées en vélib’ le 30 juin 2009. Nous pouvons voir une très forte variabilité des concentrations d’ozone. Nous avons observé que les taux diminuaient fortement à proximité des pots d’échappement. Par exemple, lorsque nous étions arrêtés à un feu rouge, les taux d’ozone diminuaient rapidement. Lors du démarrage des voitures au feu vert, les concentrations étaient très faibles (exemple à 16h30 sur la figure VIII.3).

Outre cette forte variabilité observée, nous pouvons voir une différence entre les espaces empruntés (fig. VIII.3 et VIII.4). De 13h55 à 14h15 UTC (15h55 à 16h15 heure légale). Le trajet emprunté à Vélib’ dans le 13^{ème} arrondissement parisien a une forte hétérogénéité spatiale : des espaces larges (entre la bibliothèque François Mitterrand et les voies SNCF par exemple) et des rues plus étroites avec un trafic routier plus dense (rue de Tolbiac, au début du parcours). Ce premier espace défini présente la même variabilité que le deuxième le long des quais de Seine avec pour les deux écarts-types une égalité à ± 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les variations des concentrations d’ozone dépendent essentiellement ici de la proximité du trafic routier. Par ailleurs, à la fin du trajet dans le 13^{ème} arrondissement parisien sur le premier espace, les rues étaient plus ouvertes avec un trafic routier moins dense, expliquant des taux d’ozone plus élevés qu’au début du parcours, rue de Tolbiac. A la fin de notre itinéraire en vélo (de 15h15 à 16h30 heure UTC), nous avons emprunté les chemins, assez éloignés de la circulation, entre le quai d’Orsay, les voies rapides et la Seine. La circulation étant plus éloignée, la variabilité de l’ozone est plus faible (écart-type égal à ± 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et des taux en moyenne plus élevés (138 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, contre 111 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l’espace 1 et 107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l’espace 2).

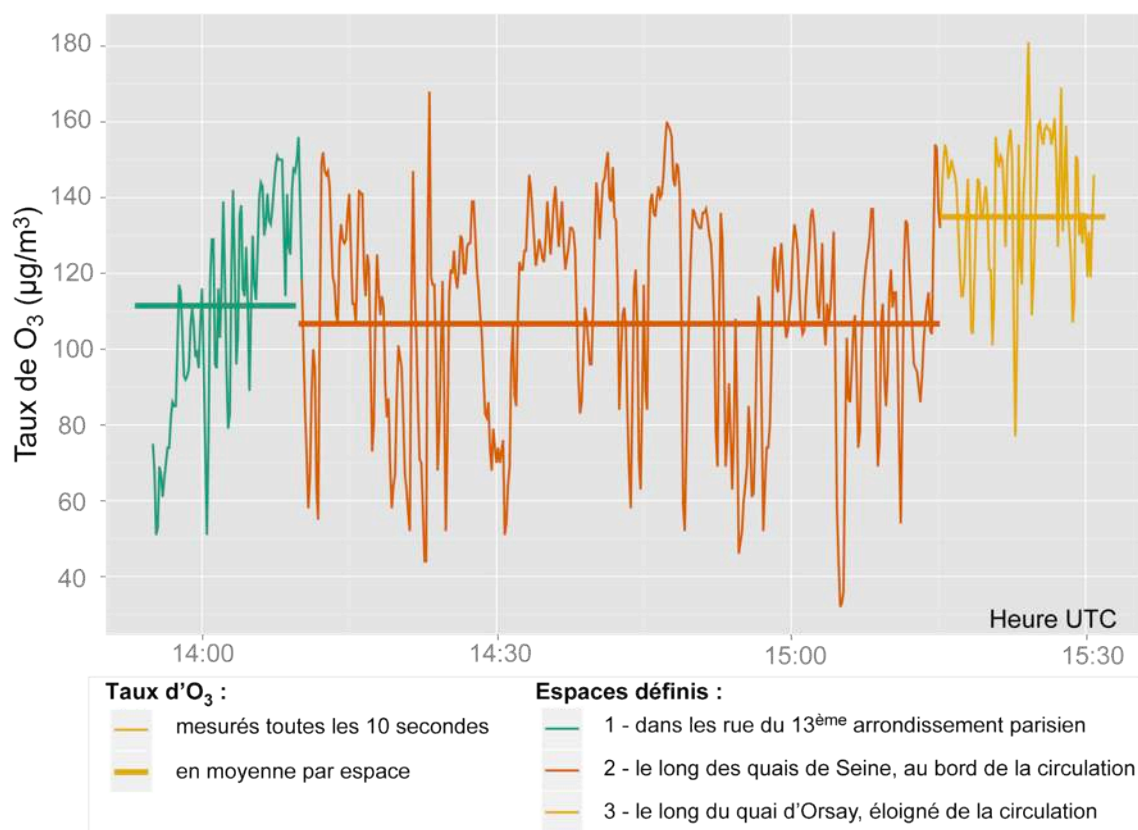


Figure VIII.3 : Taux d'ozone mesurés à vélo avec un pas de temps de 10 secondes le 30 juin 2010

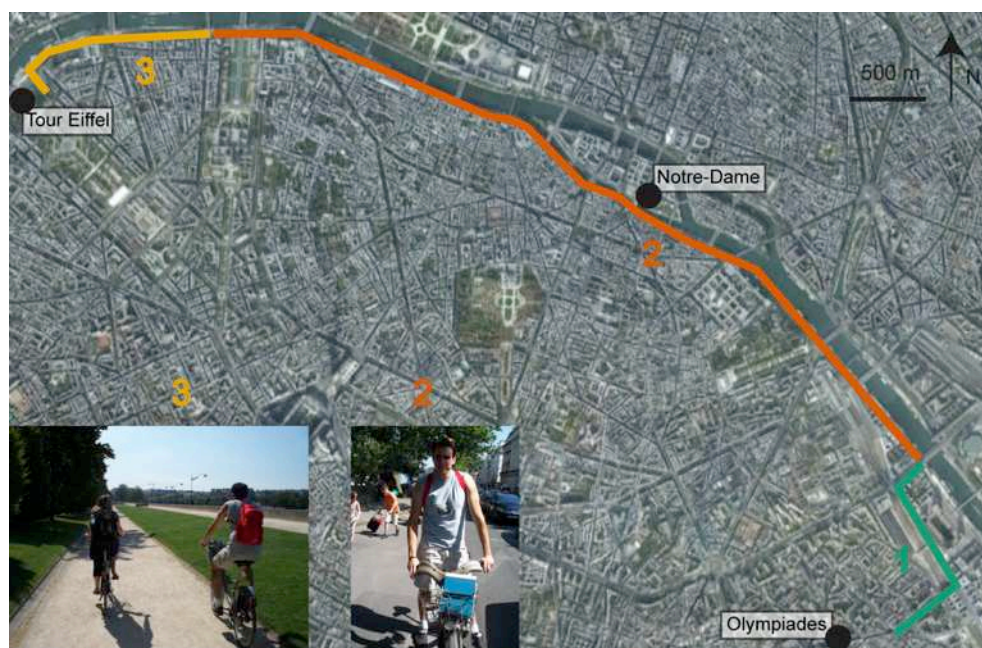


Figure VIII.4 : Trajet des mesures des taux d'ozone à vélo le 30 juin 2010 et photographie sur le quai des Saints Augustins (à droite) et sur l'allée à côté du Quai d'Orsay (à gauche)

VIII.2.2. Étude de la variabilité spatiale autour de la Tour Eiffel

Les mesures des concentrations d’ozone ont été réalisées sur le site du Champ de Mars à la Tour Eiffel le 30 juin et du Champ de Mars au Trocadéro le 1^{er} juillet 2009. Les données nous ont permis d’analyser la variabilité spatiale sur ce site mais les différences de concentrations moyennes entre les deux jours et les horaires différents (entre 16h-16h30 UTC le 30 juin et 13h50-14h20 UTC le 1^{er} juillet) ne permettent pas de comparer directement la variabilité entre les deux jours. Nous préférons donc détailler les deux événements à la suite.

Le 30 juin, nous observons une variabilité spatiale relativement faible et des valeurs assez homogènes que ce soit sur le plan horizontal ou vertical. La figure VIII.5 est un montage pour le 30 juin entre la courbe d’évolution au pas de temps de 10 secondes avec des repères cartographiques et la représentation des taux d’ozone relevés ponctuellement sur le transect.

A une micro-échelle, cette faible variabilité observée peut être liée à des rafales de vents ou bien à l’enherbement mais il est difficile de dégager des tendances. La température mesurée présente aussi une faible variabilité avec une moyenne élevée de 32 °C.

Ensuite, nous avons aussi souhaité savoir s’il existait une variabilité verticale des taux d’ozone. Pour cela, nous avons réalisé des mesures aux 1^{er} et 2^{ème} étages de la Tour Eiffel. Ceci étant, la relation entre l’altitude et les concentrations n’est pas significative : les moyennes observées au 1^{er} étage de la Tour Eiffel sont de 146 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au 1^{er} étage, de 147 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au 2nd étage, donc quasi-identiques. Par ailleurs, à la vue des variations entre les taux d’ozone mesurés par les stations de fond et la station d’observation la nuit, il serait intéressant de réaliser des mesures à différents étages en fin de soirée.

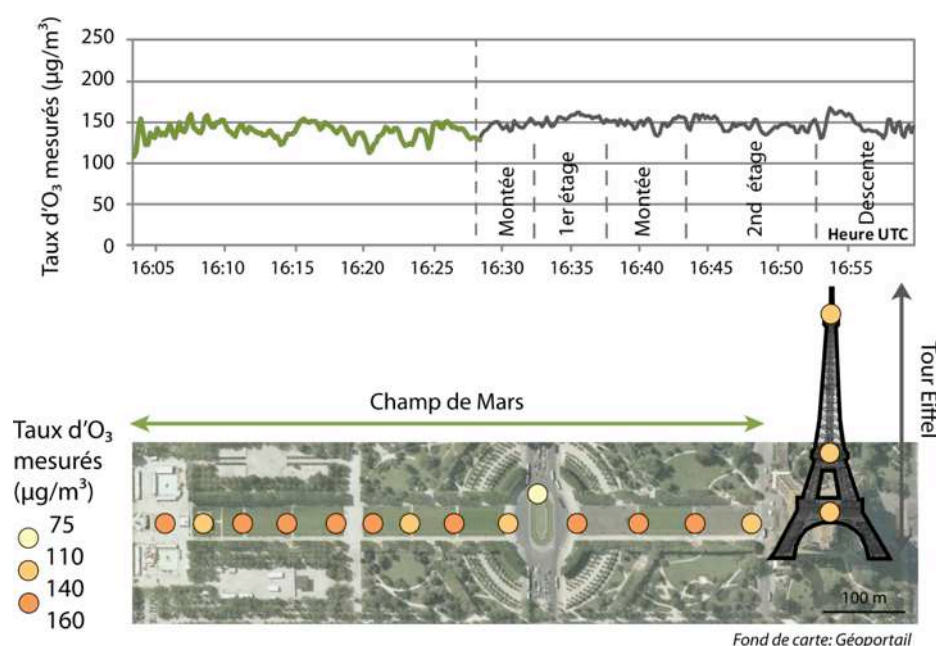


Figure VIII.5 : Variabilité spatiale des concentrations d’ozone sur le site de la Tour Eiffel, le 30 juin 2009 (heure de début des mesures : 16h03, heure de fin des mesures : 17h02)

Le 1^{er} juillet, les taux horaires d'ozone étaient en moyenne légèrement plus élevés à Paris que le 30 juin (101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière le 30 juin pour les stations de fond Airparif et 106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 01 juillet). Sur le terrain, nous avons aussi observé des taux plus importants le deuxième jour mais cette information est à prendre avec précaution car les mesures n'ont pas été faites à la même heure.

La variabilité spatiale observée sur le transect allant du Champ de Mars au Trocadéro de 13h50 à 15h05 est relativement importante (fig. VIII.6). Les taux sont plus élevés sur le site du Champ de Mars, espace vert, qu'à proximité de la circulation routière, des espaces artificialisés (route, pont d'Iéna, fig. VIII.7) et du trafic fluvial. En effet, la moyenne des taux d'ozone mesurés sur le Champ de Mars est de 167 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (sans prendre en compte les taux mesurés, délibérément, à côté du bus). La moyenne des taux d'ozone diminue à proximité de la voie de circulation des quais de Seine et sur le pont Iéna, au dessus de la Seine, où le trafic fluvial était relativement important: elle est de 166 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur le parvis de la Tour Eiffel et de 141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur les deux axes de circulation et le pont d'Iéna. Nous notons également une forte variabilité sur le Trocadéro, espace très hétérogène, avec des taux d'ozone aussi élevés que sur le Champ de Mars et à l'inverse, des taux plus faibles se rapprochant plus des concentrations observées à proximité du trafic routier et sur les espaces artificialisés. Les températures sont aussi variables et plus élevées sur le Trocadéro et au passage de la Seine (moyenne de 33,2 °C) que sur le Champ de Mars et sur le parvis de la Tour Eiffel, relativement ombragé (moyenne de 31,8°C).

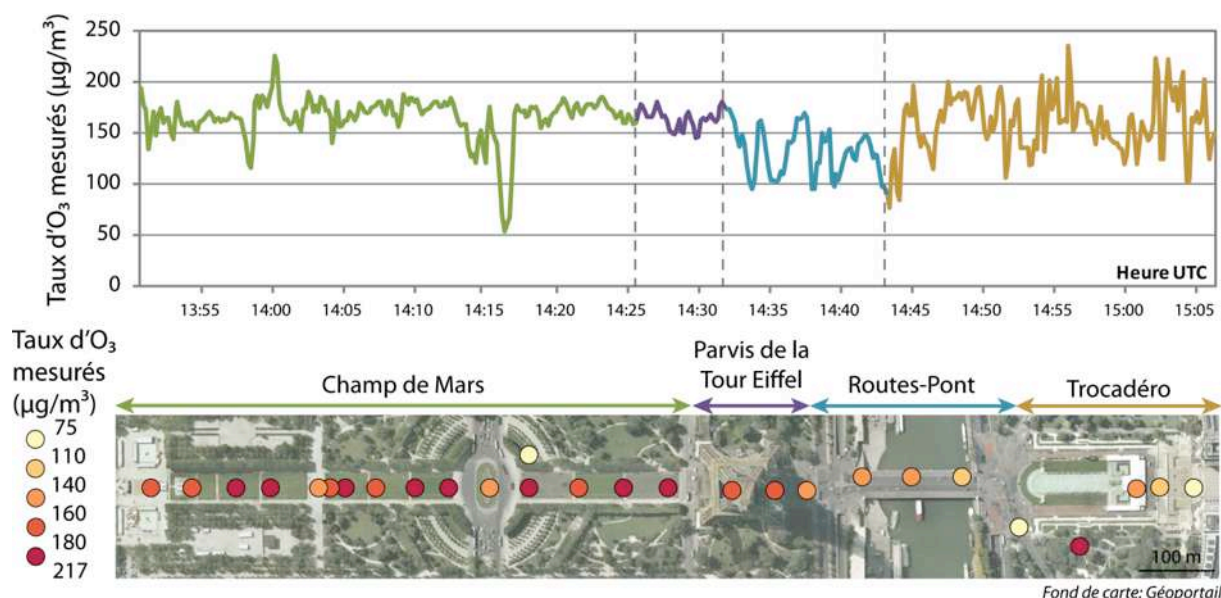


Figure VIII.6 : Variabilité spatiale des concentrations d'ozone sur le site de la Tour Eiffel, le 1^{er} juillet 2009 (heure de début des mesures : 13h51, heure de fin des mesures : 15h07)



Figure VIII.7 : Photographie du Champ de Mars (à gauche) et du Trocadéro (à droite), le 1er juillet 2009

A une échelle plus fine, nous observons donc une variabilité intra-espace, que ce soit pour les températures ou pour les taux d’ozone. Les températures sont en moyenne plus élevées au début du parcours, espace plus ouvert et avec moins de rafales de vent, que sur le reste du Champ de Mars. De plus, les taux d’ozone sont relativement plus faibles au début avec un taux moyen de $165 \mu\text{g}/\text{m}^3$ qu’au milieu et au bout du Champ de Mars avec un taux médian $173 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (sans compter le bus). Ceci peut s’expliquer par des rafales de vent (jusqu’à $4,2 \text{ m/s}$) plus fréquentes favorisant le brassage de l’air et donc la formation de l’ozone ainsi que sa concentration dans certaines zones. La variabilité au passage de la Seine s’explique également par le passage de véhicules à proximité, des péniches et des faibles brises ramenant des taux d’oxyde d’azote. Sur le Trocadéro, espace très hétérogène, la proximité d’espaces enherbés ou de zones artificialisées et de machines de construction explique la forte variabilité sur cet espace.

VIII.2.3. Étude de la variabilité spatiale sur le transect allant des Champs Élysées au Jardin des Tuileries

Les taux d’ozone relevés sont relativement plus faibles sur ce deuxième transect que sur le premier réalisé le même jour. Cependant, ils n’ont pas été mesurés en même temps et selon les moyennes horaires des stations de fond à Paris, les taux ont commencé à diminuer à partir de 16h.

La figure VIII.8 nous indique deux phases : les taux d’ozone sont en moyenne plus faibles sur l’avenue des Champs Élysées et la place de la Concorde que dans le jardin des Tuileries (respectivement $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $165 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Comme précédemment, nous remarquons que les espaces à proximité du trafic routier présentent des taux plus faibles d’ozone. Sur les Champs

Elysées, nous avons aussi pu observer que les concentrations étaient en moyenne plus élevées lors de croisements entre deux rues. De plus, dans le jardin des Tuileries, les taux sont plus faibles à la fin du transect, avec le passage au-dessus d'un tunnel assez fréquenté et 250 m plus loin, au niveau de la rue devant la pyramide du Louvre.

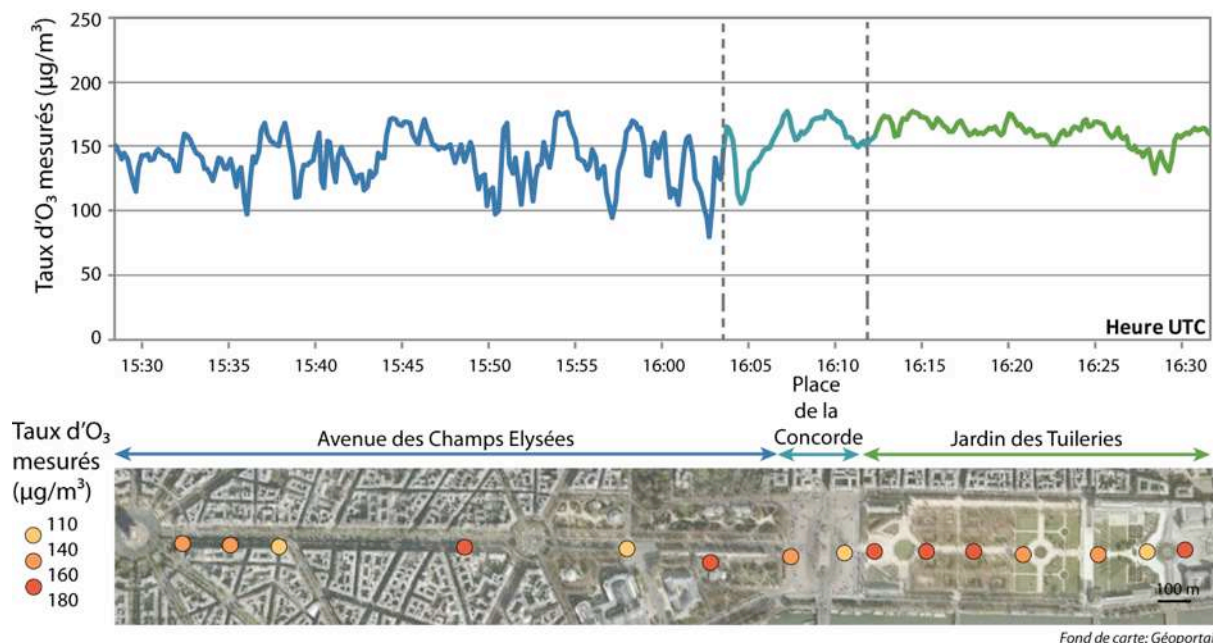


Figure VIII.8 : Variabilité spatiale des concentrations d'ozone sur le transect des Champs Elysées – Jardin des Tuileries, le 1^{er} juillet 2009

A échelle fine, les mesures de terrain ont mis en évidence une variabilité spatiale fortement liée à la proximité du trafic routier et fluvial ainsi que du type de surface : les taux sont plus faibles à proximité de la circulation routière et du trafic fluvial que dans les espaces verts



Chapitre IX

Variabilité spatiale des particules selon différents itinéraires et modes de transports touristiques à Paris

Afin d'évaluer l'exposition des touristes à la pollution de proximité lors de leur circuit touristique parisien, nous avons réalisé des mesures des taux de PM₁₀ et de PM_{2,5} selon différents modes de transport susceptibles d'être utilisés (à pied, en péniche, en bus touristique et à vélo) et selon différents itinéraires reliant des sites touristiques. Ce chapitre présente les résultats de ces mesures faites entre 2010 et 2012. Dans un premier temps, l'influence des conditions météorologiques sur les niveaux de particules mesurés est étudiée. Dans un second temps, les facteurs de variabilité locale de la pollution seront présentés.

IX.1. Influence des conditions météorologiques sur les niveaux de particules

Afin d'étudier la variabilité spatiale des particules à une échelle locale, les mesures ont été réalisées dans des situations anticycloniques printanières ou estivales, avec peu de vent (vitesse mesurée sur le terrain inférieure à 3 m/s). Les conditions météorologiques varient cependant selon les jours des mesures.

IX.1.1. Conditions météorologiques synoptiques et niveaux de particules

Les 28 et 29 juin 2010, nous avons mesuré les concentrations de particules à pied. Durant ces deux jours, la situation est anticyclonique avec des vents faibles (vitesse des vents < 3 m/s mesurée sur le terrain) et des températures estivales (20,7°C en minimale et 30,4°C en maximale à Paris Montsouris le 28 juin). Les taux de PM₁₀ et de PM_{2,5} sont plus faibles par rapport aux mesures réalisées à pied, en péniche et à vélo en mars 2011 et 2012, et en avril 2011. Nous avons en effet constaté que les taux de particules étaient les plus faibles en période

estivale (cf. Partie II), ceci s'expliquant par des températures relativement élevées ne permettant pas les inversions thermiques matinales. Les taux de PM10 mesurés sont cependant supérieurs aux niveaux moyens annuels en 2010 (49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour les stations à proximité du trafic routier et 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour les stations urbaines, selon les données Airparif).

Date	Concentration moyenne de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration moyenne de PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Données météorologiques mesurées à Paris Montsouris (Météo France)	
			Vent moyen horaire (m/s)	Température minimale journalière (°C)
28 juin 2010 à pied	59	12	2-3,5	20,7
29 juin 2010 à pied	36	8	2-4	17,8
25 mars 2011 en bus	143	81	1-2	8,2
26 avril 2011 en bus et en péniche	83	39	2,5-4	12,1
21 mars 2012 en vélo	77	26	3-4	5,4
26 mars 2012 en vélo	69	18	3-4	9,8

Tableau IX.1 : Concentrations moyennes de PM2,5 et PM10, vitesse du vent et température minimale selon les jours et les modes de transport utilisés

Le 25 mars 2011, nous avons réalisé des mesures de taux de PM10 et de PM2,5 au deuxième étage d'un bus touristique. Les niveaux de PM10 et de PM2,5 mesurés sont très élevés (tab. IX.1). Ce qui s'explique par plusieurs jours, du 20 au 25 mars 2011, avec une situation anticyclonique avec de fortes pressions (entre 1025 hPa et 1035 hPa), des vents faibles à modérés et des températures matinales faibles (entre 0°C et 7°C à Paris Montsouris) facilitant les inversions thermiques. Le 25 mars, la vitesse du vent mesurée aux arrêts du bus était inférieure à 2 m/s. Un épisode de pollution a été constaté sur l'agglomération parisienne à partir 14h00 pour les PM10, avec dépassement du seuil d'information et de recommandation de la procédure d'information et d'alerte.

Le 26 avril 2011, nous avons mesuré les taux de PM10 et de PM2,5 en péniche et en bus touristique. Les jours précédents les mesures, la situation est assez instable : l'Île-de-France est en situation de marais barométrique avec des orages faibles et localisés. Le 26 avril, une hausse de pression ramène une situation assez stable avec des vents relativement faibles (inférieurs à 4 m/s en moyenne à Paris Montsouris et à 3 m/s lors des mesures). Cette situation a entraîné une stagnation des particules mais n'a pas duré plusieurs jours consécutifs.

Les mesures en vélo ont été réalisées le 21 mars et le 26 mars 2011 durant l'épisode de pollution présenté dans le chapitre VI. L'anticyclone centré sur l'Europe de l'est a entraîné un temps

calme, des températures relativement fraîches permettant la formation d'inversion thermique matinale et la concentration des particules.

IX.1.2. Influence des précipitations sur le lessivage de la pollution de l'air

Les concentrations de PM₁₀ et de PM_{2,5} sont plus faibles le 29 juin que le 28 juin. En fin d'après-midi et le soir du 28 juin, des orages éclatent localement, apportant de fortes précipitations. Les particules en suspension sont rabattues vers le sol mouillé, ce dernier empêchant alors la remise en suspension des particules par le vent ou les brises. Ce phénomène est d'autant plus remarquable dans le jardin des Tuileries où les concentrations étaient beaucoup plus élevées le 28 juin que le 29 juin (fig. IX.1, fig. IX.2 D).

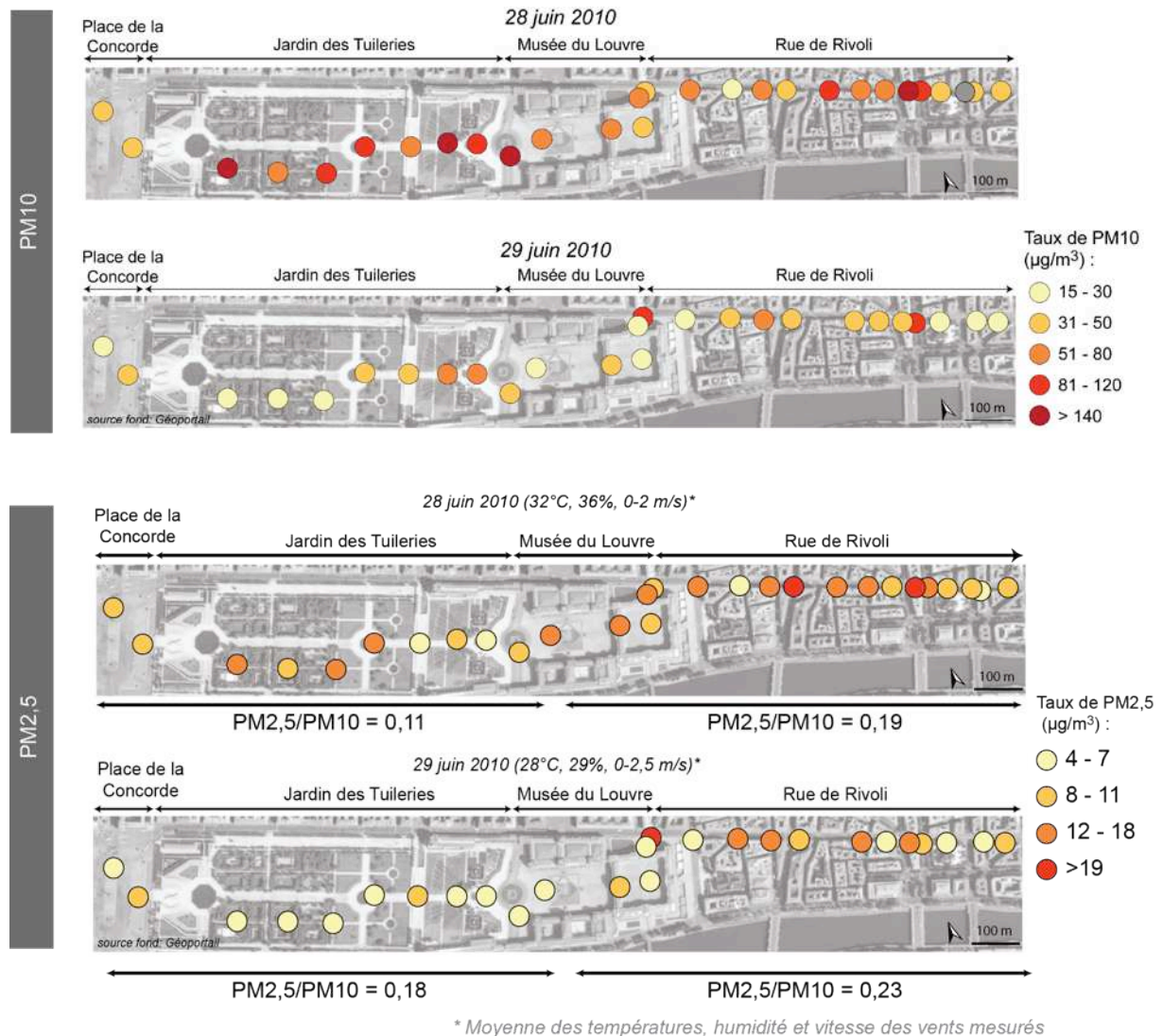


Figure IX.1 : Concentrations moyennes sur une minute de PM₁₀ et de PM_{2,5} lors de trajet à pied de 14h à 16h, les 28 et 29 juin 2010



A - Rue de Rivoli, 28 juin, 15h15



B - Parvis du musée du Louvres, 28 juin, 15h30



C - Jardin des Tuileries, 28 juin, 15h35



D - Jardin des Tuileries, 29 juin, 15h50

Figure IX.2 : Photographies prises le 28 juin (A,B,C) et le 29 juin 2010 (D) durant les mesures de particules

IX.2. Influence de la proximité des sources d'émission

Nous avons pu observer en mesurant les concentrations de particules puis en les analysant, une forte variabilité spatiale dépendante des sources d'émission d'origine naturelle ou anthropique.

IX.2.1. Des émissions d'origine terrigène

La figure IX.1 présente les taux moyens de PM₁₀ mesurés sur une minute lors du trajet à pied allant de la rue de Rivoli à la Place de la Concorde, les 28 et 29 juin 2011. Le 28 juin, les concentrations en PM₁₀ étaient relativement élevées dans le jardin des Tuileries (moyenne de 94 µg/m³), s'expliquant par un sol nu qui au contact de brises ou de mouvements turbulents met les particules d'origine terrigène (limons et argiles) en suspension. Le soir, un orage a eu lieu entre 19h et 20h ; les précipitations ont lessivé les particules fines et les ont bloquées au niveau du sol. Le 29 juin, le sol mouillé du jardin des Tuileries empêche la mise en suspension des

particules au sol (phénomène similaire décrit dans Johansson *et al.*, 2007). Les taux de PM₁₀ et de PM_{2,5} mesurés sont donc plus faibles en moyenne (respectivement, 36 µg/m³ et 6 µg/m³ dans le jardin des Tuileries).

Nous avons calculé le ratio PM_{2,5}/PM₁₀ (fig. IX.1). Plus le ratio est élevé, plus la proportion de particules fines (diamètre aérodynamique < 2,5 µm) est forte dans le total des particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 µm. Ce ratio est plus élevé dans la rue de Rivoli (0,18 le 28 juin et 0,23 le 29 juin) que dans le jardin des Tuileries (0,11 le 28 juin et 0,19 le 29 juin). Les particules mesurées dans le jardin des Tuileries sont plus grossières que celles mesurées à proximité de la circulation routière. Par ailleurs, le ratio est plus élevé le 29 juin que le 28 juin. Les particules présentes dans l'air le 29 juin sont donc essentiellement d'origine anthropique.

Dans les parcs avec un sol nu, une partie des particules mesurées sont d'origine naturelle. Elles sont moins nocives pour la santé car elles sont solides et non cancérigènes, à l'inverse des particules liquides issues des pots d'échappement dont les compositions chimiques peuvent être très différentes et plus dangereuses pour la santé (Host *et al.* 2008). De plus, les particules d'origine naturelle étant plus grossières, elles s'infiltrent moins dans les voies respiratoires (Weber *et al.*, 2007). Nous avons cependant ressenti des irritations oculaires et une gêne à cause des particules remises en suspension par les brises lors des mesures.

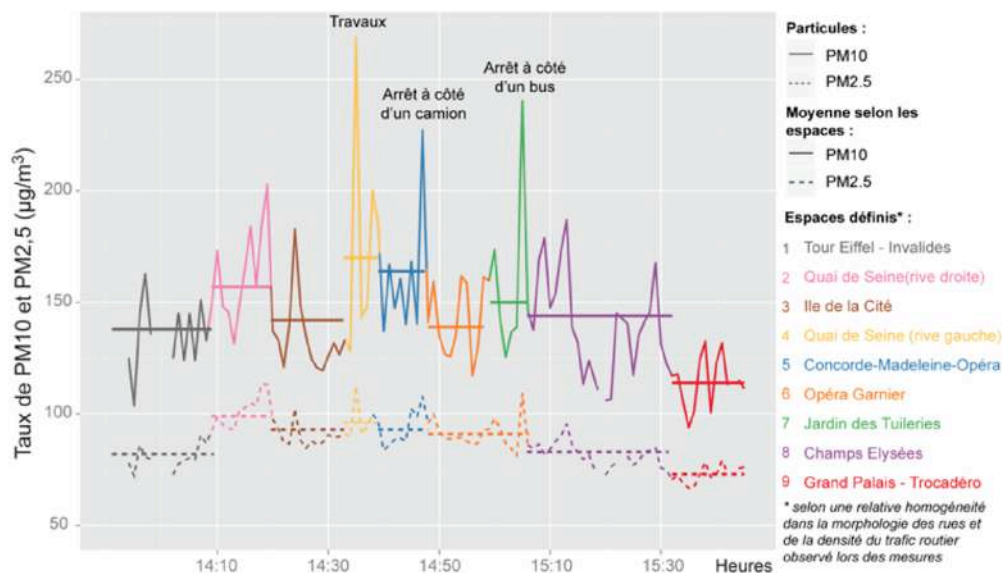
IX.2.2. Des émissions d'origine anthropique

Lors des mesures réalisées, à pied, le 28 et le 29 juin, nous avons observé des pics de concentrations de PM₁₀ et de PM_{2,5} dans la rue de Rivoli, où le trafic routier était relativement dense (fig. IX.1, fig. IX.2 A). Le passage à côté de travaux et particulièrement d'un marteau piqueur a engendré une forte augmentation des particules (jusqu'à 1338 µg/m³). Les taux sont plus élevés lorsque le capteur était plus proche des pots d'échappement lors des trajets à pied. La même variabilité due au trafic routier et aux travaux a été observée lors des trajets en bus et à vélo.

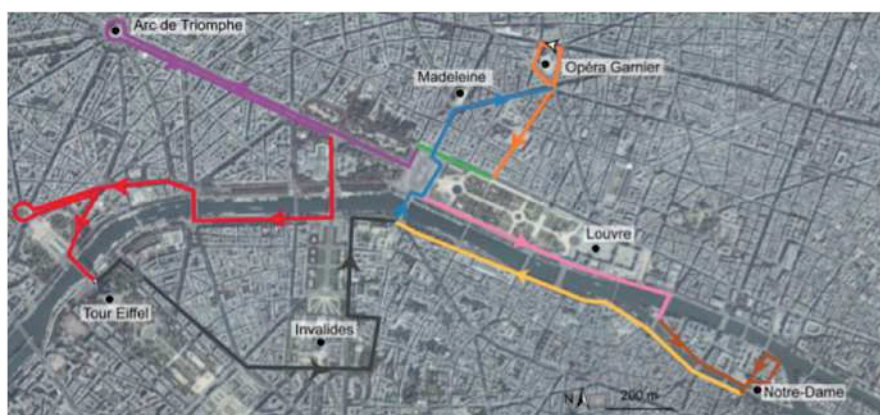
La figure IX.3 présente, d'une part, les concentrations de PM₁₀ et de PM_{2,5} mesurées au deuxième étage d'un bus touristique de 13h55 à 15h50 le 25 mars 2011 et, d'autre part, les moyennes des taux selon des espaces à peu près homogènes au niveau de la morphologie urbaine et de l'intensité de la circulation automobile (fig. IX.3). Les concentrations de PM₁₀ et de PM_{2,5} étaient fortement corrélées durant ce trajet, avec un coefficient de corrélation égal à 0,83. Une forte variabilité est observée pour les PM₁₀ et les PM_{2,5}. Elles s'expliquent principalement par la densité du trafic routier à côté du bus touristique. Par exemple, sur les quais de Seine, côté rive droite, très fréquentés, les concentrations étaient en moyenne égales à 170 µg/m³ ; et à l'inverse, autour de la Tour Eiffel et des Invalides, où le trafic était relativement faible, la moyenne des taux de PM₁₀ mesurés est de 140 µg/m³. À chaque feu rouge ou à l'arrêt du bus,

les taux ont tendance à augmenter : les particules sont émises par les pots des véhicules arrêtés à côté et du bus touristique lui-même, dont la fumée est dispersée quand le bus roule. Nous avons aussi observé des pics plus élevés lors du stationnement à côté d'un autre bus ou d'un camion.

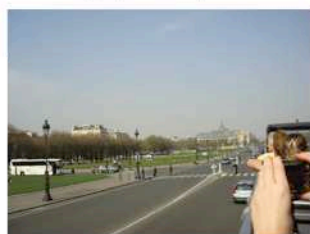
A - Variation des taux moyens par minute et par espace défini de PM10 et de PM2,5



B - Parcours du bus touristique



C - Photographie du parcours



1- Invalides



2- Quai de Seine (Rive droite)



3- Travaux quai de Seine (Rive gauche)

Figure IX.3 : Variations des concentrations moyennes sur une minute en PM10 et en PM2,5 et moyenne selon les différents espaces (traits horizontaux), parcours et photographies lors d'un trajet en bus touristique de 13h55 à 15h50 le 25 mars 2011

La figure IX.4 présente les mesures des taux moyens de PM10 et de PM2,5 faites en péniche le 26 avril 2012. Les taux de PM10 sont très variables, contrairement aux taux de PM2,5. Le coefficient de corrélation est égal à 0,65. Il est significatif mais plus faible que les mesures réalisées sur le bus. Les maxima de particules ont été mesurés durant les demi-tours de la péniche, qui émettait des particules grossières. Les pics de particules fines ont été observés lors de passages de péniches à proximité du bateau. De plus, nous avons pu observer de faibles brises tout au long du parcours (entre 2 et 3 m/s) expliquant certains pics de PM10.

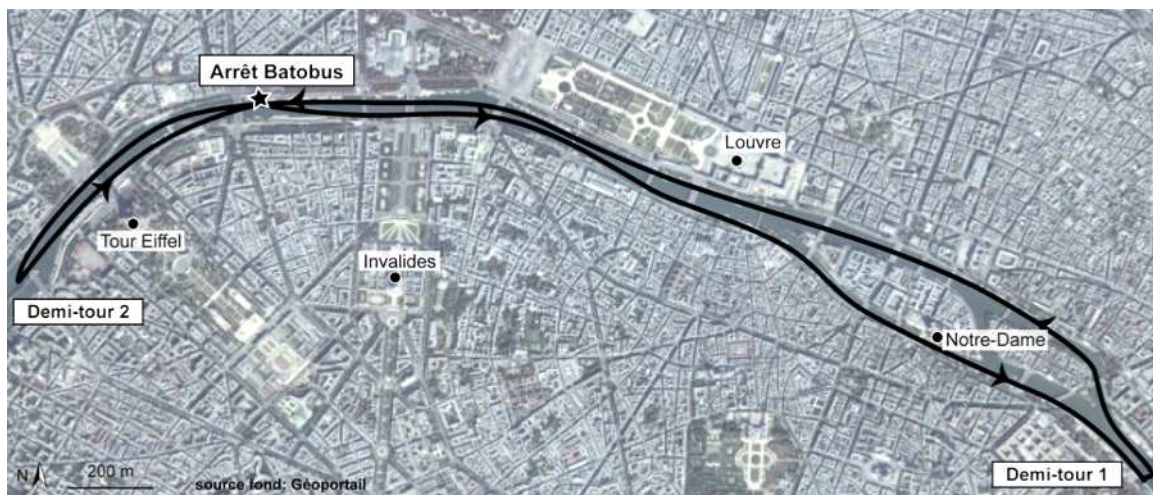
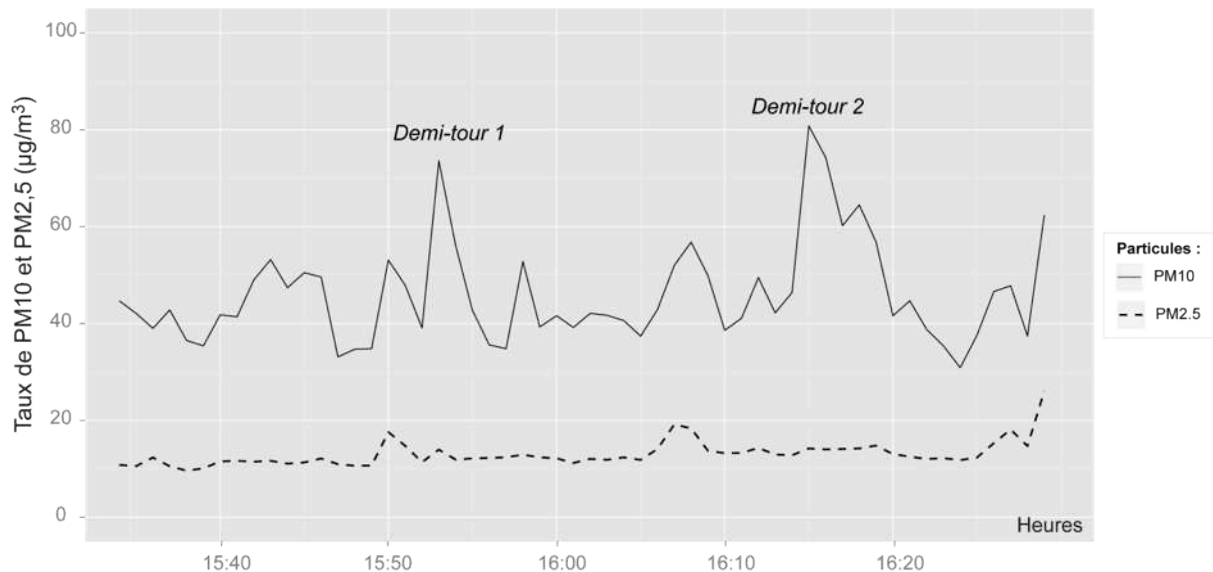


Figure IX.4 : Concentrations moyennes sur une minute en PM10 et en PM2,5 mesurées en péniche et trajet de la péniche le 26 avril 2011

Les mesures de particules à l'échelle locale indiquent une forte variabilité spatiale très dépendante des sources d'émission et particulièrement du trafic routier. Nous avons pu observer cette même tendance pour les mesures réalisées à vélo.

IX.3. Influence de la morphologie urbaine et des brises

La figure IX.5 A présente la variabilité spatiale des concentrations de PM_{2,5}, le 21 mars 2012 à vélo. Nous pouvons observer que les taux mesurés sont supérieurs dans la rue Royale que sur l'avenue des Champs Élysées. Dans la mesure où le trafic routier était dense et similaire sur les deux axes (fig. IX.5 B), ceci peut s'expliquer par le fait que les rues encaissées empêchent la dispersion des polluants.

Nous pouvons observer que le tableau IX.5 C que le ratio PM_{2,5}/PM₁₀ est plus élevé dans la rue Royale (282 m) que sur l'avenue des Champs Élysées (1 910 m); c'est-à-dire que la proportion de particules fines est plus élevée dans la rue canyon. Par ailleurs, les vitesses de vents mesurées lorsque le bus s'arrêtait ou de nos arrêts à vélo sont également relativement plus élevées dans la rue Royale que sur l'avenue des Champs Élysées. Les particules les plus fines sont plus légères et sont donc certainement maintenues en suspension lors de faibles brises dans la rue canyon. Cette hypothèse pourrait être validée en plaçant deux capteurs de particules dans une rue encaissée et sur une avenue large.

IX.4. Différences entre les modes de transport utilisés

Il est difficile de comparer les taux moyens de particules selon les modes de transport car les mesures ont été réalisées des jours différents avec des niveaux de fond variables. Afin d'évaluer quel est le moyen de transport qui expose le plus à la pollution de l'air, des mesures devraient être réalisées en même temps dans les transports.

Cependant, nous avons calculé le ratio moyen PM_{2,5}/PM₁₀ pour les mesures à pied, en bus et à vélo selon les jours de mesures : 0,20 le 28 juin 2010 à pied, 0,22 le 29 juin 2010 à pied, 0,47 le 25 mars 2011 en bus, 0,52 le 26 avril 2011 en bus, 0,33 le 21 mars 2012 à vélo et 0,26 le 26 mars 2012 à vélo. Le ratio calculé est plus élevé en bus : les particules les plus fines sont proportionnellement plus nombreuses dans ce mode de transport. Ce qui s'explique d'une part, par la proximité immédiate avec le trafic routier qui émet un plus grand nombre de particules fines, particulièrement avec les nouveaux filtres des moteurs diesel, et d'autre part, par les mesures au deuxième étage. Les particules les plus fines sont plus légères et elles peuvent être plus hautes en suspension que les particules plus grossières et plus lourdes. Par ailleurs, ce ratio est plus faible à pied car ce sont les mesures les plus éloignées de la circulation routière.

A - Variabilité spatiale des taux moyens par minutes des PM_{2,5} lors des mesures à vélo le 21 mars 2012


B - Photographies de l'avenue des Champs Élysées et de la rue Royale le 21 mars 2012



Avenue des Champs Élysées



Rue Royale

C - Taux de PM₁₀ et de PM_{2,5}, ratio PM_{2,5}/PM₁₀ et vitesse du vent en moyenne mesurée sur l'avenue des Champs Élysées et dans la rue Royale

	Avenue des Champs Élysées				Rue Royale			
	PM ₁₀ *	PM _{2,5} *	PM _{2,5} /PM ₁₀	Vitesse du vent (m/s)**	PM ₁₀ *	PM _{2,5} *	PM _{2,5} /PM ₁₀	Vitesse du vent (m/s)**
25 mars 2011 en bus	155	76	0,49	<0,8	162	94	0,58	1-2,5
21 mars 2012 à vélo	85	26	0,30	<1	91	34	0,37	1-2
26 mars 2012 à vélo	73	21	0,29	<1	82	29	0,35	1-2

*Taux moyens sur l'avenue et la rue (en µg/m³)

** Vitesse du vent mesurée aux arrêts du bus

Figure IX.5 : Taux de PM₁₀ et de PM_{2,5} mesurés sur l'avenue des Champs Élysées et la rue de Royale en bus touristique le 25 mars 2011 et à vélo le 21 et 26 mars 2012

Les mesures itinérantes des taux de PM₁₀ et de PM_{2,5} ont permis de mettre en évidence une forte variabilité spatiale à une échelle fine et d'en identifier les facteurs. La proximité des sources d'émission anthropique (trafic routier, chantiers de travaux publics) et dans les parcs (particules « terrigènes ») influent sensiblement sur les mesures et entraînent de fortes





variations des concentrations en particules fines. Elles permettent d'estimer que les touristes sont les plus exposés à proximité du trafic routier ou dans le flux (à vélo et en bus), et qu'ils peuvent être gênés dans les parcs par les particules d'origine « terrigène ». Les mesures sont cependant assez empiriques et peu exhaustives. Il serait intéressant de comparer les différences dans les différents modes de transport à l'aide de capteurs réalisant ces mesures en simultané. Enfin, la taille, la morphologie et la composition chimique des particules sont différentes selon leur origine (naturelle ou anthropique) : ce qui peut jouer un rôle dans leurs propriétés toxicologiques.

Conclusion partie III




Cette troisième partie met en évidence variabilité spatiale de l’ozone et des particules sur des itinéraires et dans différents modes de transport touristiques parisiens afin d’évaluer l’exposition des touristes à la pollution atmosphérique extérieur. Les concentrations d’ozone et de particules mesurées sont très variables à l’échelle locale selon la proximité des sources d’émission, la morphologie urbaine et le mode de transport, comme le montre le schéma ci-dessous.

Où les niveaux d'O₃ et de PM sont-ils les plus élevés sur les sites et dans les modes de transport touristiques parisiens ?

➡ Proximité des sources d'émission

- Trafic routier  O_3  PM10 et PM2,5
(proportion de PM2,5 importante plus on se rapproche du trafic)
- Travaux  PM10 et PM2,5
- Sol nu - terrigène  PM10 et PM2,5 (proportion de PM10 plus importante)

➡ Morphologie urbaine

- Couvert végétal  O₃
- Rue canyon  PM10 et PM2,5 (proportion de PM2,5 plus importante lors de brises)
- Rue large  PM10 et PM2,5

Partie IV

Perception de la pollution de l'air par les touristes à Paris



L'objectif de cette quatrième partie est d'évaluer la perception qu'ont les touristes de la pollution de l'air lors de leur séjour à Paris. Cette partie présente donc les résultats des enquêtes de terrain réalisées au cours de l'été et de l'automne 2011 sur trois sites très visités à Paris : la Tour Eiffel, de Notre-Dame et du Sacré-Cœur.

Le premier chapitre (X) de cette partie décrit la méthode d'enquêtes par questionnaires utilisée ainsi que les jours et les sites où nous avons interrogé les touristes.

Le second chapitre (XI) met en parallèle l'exposition des touristes à la pollution extérieure estimée et leur perception de la qualité de l'air selon les différents jours des enquêtes et les sites.

Le troisième chapitre (XII) s'intéresse à la perception et à la représentation qu'ont les touristes de la pollution de l'air selon leur origine géographique, la médiatisation du sujet et leur culture.



Chapitre X

Questionnaires, lieux et jours des enquêtes

Afin de décrire la perception de la qualité de l'air par les touristes, et de la mettre en relation avec différents déterminants, nous avons interrogé les touristes à l'aide d'enquêtes sur différents lieux touristiques. Ce chapitre présente les choix qui ont été faits dans la construction du questionnaire, l'échantillonnage des enquêtés, les lieux et les jours des enquêtes.

X.1. Construction des enquêtes par questionnaire

La méthode d'enquêtes par questionnaire est la plus utilisée dans l'étude de la perception de la qualité de l'air (Moch et Roussel, 2000 ; Gailhard-Rocher, 2008 ; Bélanger *et al.*, 2009 ; ORS, 2010). Elle permet d'interroger un grand nombre de personnes : la pollution de l'air a un risque individuel plutôt faible, mais elle touche un grand nombre de personnes. Afin de pouvoir interroger une diversité de touristes selon leur région d'origine, nous avons fait le choix d'enquêtes qualitatives avec des questions fermées (fig. X.1), car elle permet d'interroger un grand nombre de touristes.

Les touristes sont peu enclins à répondre à des questions lors de week-end ou vacances à Paris. Les enquêtes par questions fermées permettent de raccourcir le temps des enquêtes, et un plus grand nombre de touristes acceptent ainsi d'y répondre.

Cette méthode nous permet ainsi de quantifier et de comparer les différentes opinions des touristes sur la pollution de l'air parisienne. Cependant, il est difficile avec cette méthode d'analyser et de comprendre tous les résultats. Par le caractère bref des questionnaires, beaucoup de facteurs qui jouent un rôle certain dans la représentation ne peuvent pas être pris en compte (état de santé, tabagisme, lieu de vie...). Les entretiens semi-directifs, à l'aide de discussions, permettent de mieux appréhender les représentations et d'aller plus loin dans leurs interprétations (Annesi-Maesano, 2007). Nous n'avons pas réalisé ce type d'entretien mais certains touristes, étant intéressés par le sujet, ont souhaité discuter avec nous de ce qu'ils ressentaient de la pollution de l'air lors de leur séjour en région parisienne et souvent, aller plus

Paris.



Date :/...../.....

Lieu :

Indicateur cognitif

Indicateurs sensoriels et sanitaires

Représentation des nuisances environnementales et de la pollution de l'air à Paris et sur leur lieu d'habitation

Figure X.1 : Questionnaire réalisé auprès des touristes à Paris en 2011 (recto)

7. Durant votre séjour,		Désagréable	Plutôt désagréable	Correct	Agréable	Très agréable	Indicateurs sensorielles
⇒ le temps est		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⇒ la température est		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⇒ le bruit est		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⇒ la propreté de la ville est		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Information générale :

Indicateur cognitif	9. Séjournez -vous ?	Indicateurs sur leur séjour en région parisienne	
	<input type="checkbox"/> Dans Paris		
	<input type="checkbox"/> En banlieue parisienne, précisez la ville :		
	10. Depuis combien de jours ?		
Indicateurs sociodémographiques et origine des touristes	11. Etes-vous hébergés dans :	Indicateurs sur les moyens de transport utilisés	
	<input type="checkbox"/> Un hôtel		
	<input type="checkbox"/> Un camping		
	<input type="checkbox"/> Un appartement loué		
	<input type="checkbox"/> Une chambre chez l'habitant	<input type="checkbox"/> Autre (famille, amis...)	
	12. Aviez-vous déjà séjourné à Paris ?		
	<input type="checkbox"/> Jamais	<input type="checkbox"/> Quelques jours	<input type="checkbox"/> Quelques semaines
	<input type="checkbox"/> Quelques mois	<input type="checkbox"/> Plus d'un an	
	13. Votre moyen de transport :		
	⇒ pour arriver à Paris ? Plusieurs réponses possibles		
	<input type="checkbox"/> Avion	<input type="checkbox"/> Voiture	<input type="checkbox"/> Car (autobus)
	<input type="checkbox"/> Train	<input type="checkbox"/> Autre, précisez :	
	⇒ pour vous déplacer dans Paris ? Plusieurs réponses possibles		
	<input type="checkbox"/> Voiture	<input type="checkbox"/> Car touristique	<input type="checkbox"/> Taxi
	<input type="checkbox"/> Transport en commun (métro, RER, bus)	<input type="checkbox"/> Vélo (Vélib')	<input type="checkbox"/> A pieds
	Réponses facultatives :		
	14. Âge : Ans		
	15. Sexe : <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M		
	16. Nationalité :		
	17. Ville ou région de votre lieu de domicile :		

Figure X.1 : Questionnaire réalisé auprès des touristes à Paris en 2011 (verso)

X.1.1. Évaluation de la pollution de l'air par les touristes

Pour demander aux touristes d'évaluer la pollution atmosphérique, deux questions sont posées : la première « *Est-ce que la ville de Paris est polluée ?* » avec le choix de répondre « *oui* » ou « *non* » (question 5 ; fig. X.1) et la seconde est une note sur une échelle de 1 (très bonne qualité de l'air)

à 10 (très mauvaise qualité de l'air) calquée sur l'indice de qualité de l'air français Atmo (question 5 ; fig. X.1). La plupart des pays occidentaux utilisent des indices de qualité de l'air. Ils sont calculés différemment mais le principe est le même, avec une échelle allant d'une bonne qualité de l'air à une qualité de l'air médiocre (*cf.* chapitre III). Sur le site de l'Office du Tourisme et des Congrès de Paris (<http://www.parisinfo.com>) une page est consacrée à la pollution de l'air à Paris citant cet indice (fig. X.2). Le choix de cet indice nous a ainsi permis de comparer la représentation de la qualité de l'air à Paris et sur leur lieu d'habitation.



Figure X.2 : Extrait de la page sur la qualité de l'air à Paris sur le site de l'Office du Tourisme et des Congrès de Paris, source : <http://www.parisinfo.com>, consulté en octobre 2012

Nous noterons cependant que la première question est posée sur la *pollution de l'air* et la seconde sur la *qualité de l'air* pour faire référence à l'indice informatif. Les deux termes veulent exprimer la même idée mais le mot pollution renvoie à une vision plus négative que le terme qualité.

X.1.2. Facteurs de représentation de la pollution de l'air

Les enquêtes par questionnaire permettent « de scruter les représentations sociales de l'espace et de tester certains des nombreux facteurs qui se combinent pour les influencer » (Goeldner-Gianella et Humain-Lamoure, 2010). Nous avons déterminé plusieurs facteurs qui pouvaient influencer la perception des touristes de la pollution de l'air à Paris, à l'aide de la littérature sur la perception de la pollution de l'air et sur la qualité de vie dans les grandes villes (Charles *et al.*, 2007), tels que :

- les nuisances sanitaires ressenties (irritations des yeux, du nez, difficultés respiratoires, fatigue) ;
- les perceptions sensorielles (visibilité, odeurs, bruit) ;
- le temps à Paris (temps, température) ;
- leurs connaissances sur les problèmes environnementaux ;
- leur origine (pays et ville);
- leurs modes de transport pour arriver à Paris (avion, voiture, train, bus...) et se déplacer dans Paris (voiture, transport en commun, vélo, à pied...) ;
- leurs type et lieu d'hébergement ;
- des indicateurs sociodémographiques (sexe et âge).

Les premières enquêtes ont été réalisées en 2009 avec un questionnaire avec une liste de déterminants plus longue (cf. annexe E). Il s'est avéré trop long et peu de touristes souhaitaient y répondre. Plusieurs questions ont été abandonnées. Par exemple, une des questions importantes que nous nous posons est de savoir si la perception de la pollution de l'air par les touristes peut avoir un impact sur l'activité touristique à Paris. Afin d'y répondre, nous avons posé deux questions dans le questionnaire :

- « *La qualité de l'air de Paris a-t-elle été prise en compte dans votre choix de destination touristique ?* »

- « *La qualité de l'air durant ce séjour peut-elle être un frein à votre retour dans Paris ?* »

La plupart des touristes interrogés ne savaient pas quoi répondre à ces deux questions, nous avons choisi de ne plus les poser tout en réfléchissant à ces questions indirectement à partir des autres réponses.

Le questionnaire a aussi été réorganisé à la suite de tests durant l'été 2010 (cf. annexe F). Par exemple, les questions sur le ressenti sanitaire des touristes a été placé avant les questions sur leur évaluation de la pollution de l'air parisienne pour éviter d'influencer leurs réponses. Quelques éléments de réponses ont aussi été complétés. Pour la question 2 « *Selon ces symptômes (odeurs désagréables, visibilité réduite, irritation des yeux, ...) peuvent être dus :* », nous avons pensé au « *bruit* », à la « *météo* » et à la « *pollution de l'air* » comme réponse. De nombreux touristes ont proposé dans « *autre* », la « *propreté de la ville* » ainsi que le « *métro* » que nous avons ajoutés à nos réponses.

X.2. Diversité des touristes interrogés

L'Office du Tourisme et des Congrès de Paris a estimé à 28,2 millions le nombre de touristes ayant séjourné dans les hébergements parisiens. Ce chiffre ne prend en compte ni l'hébergement en Île-de-France, ni l'hébergement amical ou familial

Nous avons interrogé environ 500 touristes. Cependant, 420 enquêtes ont été retenues car les touristes ne semblaient pas bien comprendre les questions ou répondaient rapidement sans y réfléchir. Par exemple, lorsque l'enquêteur proposait un mot avec un niveau sonore plus élevé, le touriste répondait par ce mot. Les quelques enquêtes qui nous semblaient peu fiables ont été marquées et mises de côté.

La constitution de l'échantillon de nos enquêtés s'est fait principalement selon le pays des touristes. Chaque année, l'office du tourisme et des congrès de Paris publie un rapport sur l'activité touristique de l'année passée à Paris dans lequel la proportion des origines principales des touristes est quantifiée selon les arrivées hôtelières (Office du tourisme et des congrès de Paris, 2010 ; tab. X.1). Ce classement prend en compte uniquement les personnes séjournant à l'hôtel. Nous nous en sommes servis comme base, pour traduire les questionnaires, diversifier les origines des touristes et avoir un échantillon un minimum représentatif. Ainsi, la moitié des touristes interrogés étaient français, et l'autre moitié étrangers (tab. X.2). Nous avons essayé de respecter les pourcentages des provenances des touristes étrangers, en traduisant nos questionnaires en anglais, allemand, espagnol et italien. La grande majorité des touristes, quelque soit leur origine, a répondu en français ou en anglais.

Face à la réalité du terrain avec des touristes peu enclins à répondre à nos questionnaires, nous avons interrogé assez aléatoirement les touristes étrangers. Néanmoins, la proportion de touristes interrogés par pays d'origine s'est révélée similaire à la proportion annuelle estimée par l'office du tourisme et des congrès de Paris (tab. X.1, tab. X.2). Par ailleurs, les touristes provenant du Proche et Moyen-Orient représentent presque 3% des touristes séjournant à Paris, peut-être parce qu'ils fréquentent peu les sites des monuments parisiens mais plus les commerces. Nous n'avons rencontré que des Turcs venant tous d'Istanbul sur les sites touristiques parisiens.

Arrivées hôtelières à Paris Hotel arrivals in Paris	2009	Part/total général en General % in 2009	2008	Evolution 2009/2008
Étrangers Foreign	7 905 399	54,8 %	8 367 625	-5,5 %
Français French	6 510 996	45,2 %	6 668 554	-2,4 %
Total	14 416 395	100 %	15 036 179	-4,1 %

« Top 10 » des arrivées hôtelières étrangères à Paris Top 10 foreign nationalities/arrivals	2009	Part/total étranger en % of foreigners in 2009	2008	Evolution 2009/2008
1 – États-Unis	1 224 975	15,5 %	1 226 574	-0,1 %
2 – Royaume-Uni	1 108 017	14 %	1 312 232	-15,6 %
3 – Italie	725 688	9,2 %	744 927	-2,6 %
4 – Espagne	603 054	7,6 %	678 231	-11,1 %
5 – Allemagne	567 979	7,2 %	604 013	-6 %
6 – Japon	499 350	6,3 %	551 179	-9,4 %
7 – Belgique	290 108	3,7 %	280 087	+3,6 %
8 – Pays-Bas	281 013	3,6 %	266 112	+5,6 %
9 – Suisse	244 513	3,1 %	246 119	-0,7 %
10 – Proche- et Moyen-Orient	214 856	2,7 %	221 066	-2,8 %
Autres étrangers Other foreign nationalities	2 145 846	27,1 %	2 237 085	-4,1 %

Tableau X.1 : Origine des arrivées hôtelières à Paris en 2008 et 2009, source : Office du tourisme et des congrès de Paris, 2010

A- Profil des touristes selon leur pays

Nationalité	Total	Pourcentage
Français	201	46
Etrangers	239	54
Allemagne	21	9,4
Italie	21	9,4
Etats-Unis	19	8,5
Espagne	18	8,0
Royaume-Unis	17	7,6
Belgique	16	7,1
Pays-Bas	15	6,7
Japon	14	6,3
Canada	9	4,0
Chine	8	3,6
Portugal	7	3,1
Russie	7	3,1
Suède	7	3,1
Autriche	6	2,7
Suisse	6	2,7
Bésil	5	2,2
Turquie	5	2,2
Danemark	4	1,8
Grèce	4	1,8
Mexique	4	1,8
Pologne	4	1,8
Tunisie	4	1,8
Argentine	3	1,3
Irlande	3	1,3
Maroc	3	1,3
Norvège	3	1,3
Algérie	2	0,9
Côte d'Ivoire	2	0,9
Venezuela	2	0,9

B- Profil des touristes selon leur sexe

Sexe	Total	Pourcentage (%)
Femme	231	53
Homme	209	48

C- Profil des touristes selon leur âge

Âge	Total	Pourcentage (%)
18-25	74	17
26-34	82	19
35-44	93	21
45-54	75	17
55-64	80	18
65-75	36	8

Tableau X.2 : Profil des touristes interrogés selon leur pays de provenance, leur sexe et leur âge

Le tableau X.2 indique aussi les pourcentages d'hommes et de femmes interrogés ainsi que les pourcentages par classe d'âge. Nous avons essayé de respecter une parité entre le nombre d'hommes et de femmes. Les âges des gens ont été choisis aléatoirement mais sont assez bien répartis au final.

X.3. Hétérogénéité des lieux et jours des enquêtes

Nous avons réalisé les enquêtes sur trois lieux différents et durant neuf jours avec des conditions météorologiques et des niveaux de pollution variables (tab.X.3).

Cette hétérogénéité dans les lieux et dans les jours a volontairement été décidée afin d'étudier la différence entre l'exposition des touristes et leur perception, et de répondre à certaines questions que nous nous posions: *Les touristes perçoivent-ils différemment la qualité de l'air selon l'environnement des enquêtes ? Quels sont les facteurs sur les sites touristiques qui vont influencer leur perception ? Se sentent-ils plus fortement exposés à la pollution de l'air les jours où les niveaux sont les plus élevés ? La situation météorologique joue-t-elle un rôle dans leur représentation de la pollution de l'air ?*

	JOURS	INDICE ATMO	POLLUANTS de l'indice ATMO	SITES	NOMBRE D'ENQUÊTES
JUIN	lundi 27	7	O ₃	Sacré Coeur	44
	mardi 28	7	O ₃	Tour Eiffel	46
JUILLET	jeudi 7	3	O ₃	Notre Dame (<i>matin</i>) Tour Eiffel (<i>après-midi</i>)	56
	samedi 9	3	O ₃	Tour Eiffel (<i>matin</i>) Notre Dame (<i>après-midi</i>)	41
	dimanche 10	4	O ₃	Sacré Coeur	30
AOÛT	jeudi 11	4	O ₃	Notre Dame (<i>matin</i>) Tour Eiffel (<i>après-midi</i>)	52
	vendredi 12	2	O ₃ NO ₂ PM10	Tour Eiffel (<i>matin</i>) Notre Dame (<i>après-midi</i>)	48
OCTOBRE	vendredi 21	6	PM10	Tour Eiffel (<i>matin</i>) Notre Dame (<i>après-midi</i>)	65
	samedi 22	4	PM10	Tour Eiffel	58

Tableau X.3 : Jours des enquêtes avec les indices ATMO, sites des enquêtes et nombre d'enquêtes réalisées

X.3.1. Jours et heures des enquêtes de terrain

Nous souhaitons réaliser nos enquêtes durant des saisons et des jours avec une qualité de l'air différents. Il a été très difficile d'interroger les touristes en période hivernale qui ne souhaitent pas répondre à nos enquêtes.

Les enquêtes de terrain ont été réalisées au cours de l'été 2011 et durant deux journées automnales en 2011. Durant cette période, la qualité de l'air était médiocre les 27 et 28 juin et le 21 octobre 2011. Les autres jours, la qualité de l'air était de très bonne (indice 2) à bonne (indice 4) mais avec des situations météorologiques contrastées.

L'épisode de pollution des 27 et 28 juin est détaillé dans le chapitre IX. La situation est anticyclonique avec un temps sec et ensoleillé facilitant la formation et l'accumulation de l'O₃ à partir du 24 juin. Les températures sont de plus en plus élevées avec un maximum le 27 (36,8°C à la station Météo France Paris Montsouris). Le 27 et le 28 juin, les pressions descendent à 1013 hPa avec des masses d'air très chaudes et instables provenant du sud et du sud-ouest entraînant des conditions orageuses et un ciel nuageux. Dans la nuit du 27 au 28 juin, des orages ont eu lieu ainsi que vers 16h, le 28 juin.

Du 6 au 9 juillet 2011, une situation dépressionnaire avec des flux de sud ouest entraîne un ciel nuageux, des vitesses de vents modérés (de 3 à 5 m/s en moyenne horaire à Paris Montsouris) et des températures fraîches (températures maximales de 23°C le 7 juillet et de 20,7°C le 9 juillet). Dans la journée du 9 juillet, une faible poussée anticyclonique amène un temps plus calme (vitesses du vent moyen horaire entre 0,5 m/s et 3 m/s).

Du 9 au 11 août, les conditions sont anticycloniques avec un temps calme et plutôt ensoleillé permettant la formation de l'O₃. Le 11 août, le temps se dégrade avec un flux de sud-ouest. Il devient de plus en plus couvert au cours de la journée, avec un vent allant jusqu'à 7 m/s l'après-midi. La température maximale est de 25,5°C à 19h, et oscille entre 21,5°C et à 25,5°C de 10h à 19h, durant les enquêtes. Le 12 août, le ciel est couvert avec quelques précipitations. Les températures sont comprises entre 19°C et 25°C tout au long de la journée. Le vent est plutôt faible (vent moyen inférieur à 3 m/s).

Dans la nuit du 20 au 21 octobre, la situation est anticyclonique avec de légères brises mesurées à Paris Montsouris (inférieures à 2,5 m/s), les températures sont basses (minimale de 3,3°C à 7h à Paris Montsouris le 20 octobre) et une inversion thermique est observée à la station de Trappes. Les températures sont froides avec un maximum à 12°C. Le samedi 22 octobre, les pressions sont plus faibles mais la situation est toujours anticyclonique avec un temps calme, de la grisaille et du brouillard matinal. Les températures sont comprises entre 2°C et 11,5°C.

X .3.2. Trois lieux pour réaliser les enquêtes

Nous avons réfléchi et testé plusieurs lieux pour interroger les touristes. La première idée était de réaliser les enquêtes dans des hôtels, soit en laissant les questionnaires à disposition, soit en les interrogeant directement (à l'accueil ou au petit déjeuner). Les touristes ne répondent pas aux enquêtes posées à l'accueil, et souhaitent ne pas être dérangés dans l'hôtel. Il est plus facile de les interroger dans les campings mais les campeurs sont peu représentatifs de l'ensemble des touristes en région parisienne.

Nous avons aussi testé les halls de gare et les files d'attente des musées. Outre les autorisations difficiles à obtenir, nous avons jugé que les interroger à l'intérieur ne permettait pas de mettre en relation la pollution de l'air extérieur étudiée en amont et leur perception sur cette pollution.

Au final, les sites touristiques parmi les plus visités de la capitale nous semblaient les plus intéressants pour interroger une diversité de touristes et leur demander un avis sur la pollution de l'air extérieur. Trois lieux ont été sélectionnés : le parvis de Notre-Dame, du Sacré-Cœur, et de la Tour Eiffel (fig. X.3). Ces trois sites ont été choisis car ils sont les premiers sites les plus visités de la capitale, et parce qu'ils sont hétérogènes. Les trois monuments cités sont respectivement les premier, deuxième et quatrième monuments les plus visités avec 13,7 millions, 10,5 millions et 7,1 millions d'entrées en 2011 (Office du Tourisme et des Congrès de Paris, 2012). Les trois sites se situent dans des quartiers très contrastés de Paris, avec des ambiances et des environnements différents.

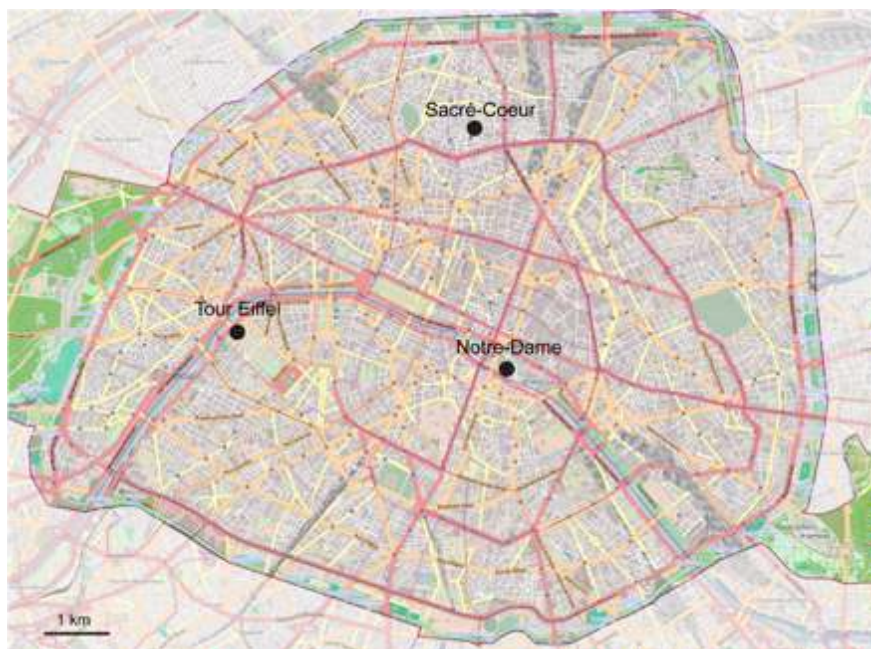


Figure X.3 : Localisation des sites des enquêtes ; source du fond de carte : OpenStreetMap

Site de la Tour Eiffel : espace «vert» et «aéré»

Le site de la Tour Eiffel, dans les « beaux quartiers parisiens », est un lieu très ouvert avec un des plus grands espaces verts de Paris, le Champ de Mars et le Trocadéro qui offre une vue dégagée sur la Tour Eiffel (fig. X.4, fig. X.5 b). Le trafic peut être assez important sur l'avenue de New York, le Pont d'Iéna et le quai Branly suivant les heures de la journée (fig. X.5 c).

Nous avons réalisé nos enquêtes de terrain sous le parvis de la Tour Eiffel au niveau des files d'attente pour y monter. Durant tous nos jours d'enquêtes, un grand nombre de touristes étaient présents sur le site avec au moins trois files d'attente, rendant l'attente parfois un peu bruyante. Par ailleurs, les touristes sont très sollicités par des vendeurs ambulants ou des mendiants. Certains d'entre eux étaient facilement agacés par toutes formes de sollicitations.

Les enquêtes sur le site de la Tour Eiffel ont été réalisées au cours de la journée (entre 11h et 16h) ou durant des demi-journées (le matin de 10h à 13h ou l'après-midi de 14h à 18h). Nous avons alterné avec le site de Notre-Dame pour interroger des touristes à différentes heures de la journée. Une de nos hypothèses était qu'en fin de journée les touristes étaient peut-être plus fatigués que le matin. Ils pouvaient être plus agacés par les nuisances et ressentir une pollution de l'air plus élevée.



Figure X.4 : Site de la Tour Eiffel avec les points et les directions des prises de vue des photographies ;
source du fond de carte : OpenStreetMap



Figure X.5 : Photographies du site de la Tour Eiffel

Le site de Notre-Dame, un espace aéré au milieu des quais de Seine et du trafic routier

Le site de Notre-Dame se situe sur l'île de la Cité entourée de la Seine (fig. X.6a et fig. X.7). Les enquêtes ont été posées sur le parvis de Notre-Dame qui est un lieu ouvert mais sans visibilité par rapport au site de la Tour Eiffel et du Sacré-Cœur (fig. X.6 b). De nombreux touristes sont présents sur le site qui est assez bruyant.

Autour du site, le trafic routier est assez dense dans les rues adjacentes et sur les quais de Seine (fig. X.6 c, d et e). Les cartes de bruit de la ville de Paris indiquent un niveau sonore élevé sur les quais de Seine, supérieur à 75 dB en journée (<http://www.paris.fr>).

Lucile Grésillon a étudié les perceptions olfactives du quartier de la Huchette, proche de Notre-Dame (fig. X.6 f). Selon ses propres mots, « *L'atmosphère du quartier de la Huchette est fortement*

chargée de senteurs.(...) Au cours d'une promenade dans le quartier, une odeur imprègne les muqueuses pour ne plus en partir : celle du mouton rôti et de friture ? Cette prééminence constitue la marque odorante de la spécialisation commerciale de l'endroit » (Grésillon, 2010 p. 48-49). Selon les heures de la journée, ces odeurs peuvent être source de gêne pour les touristes.

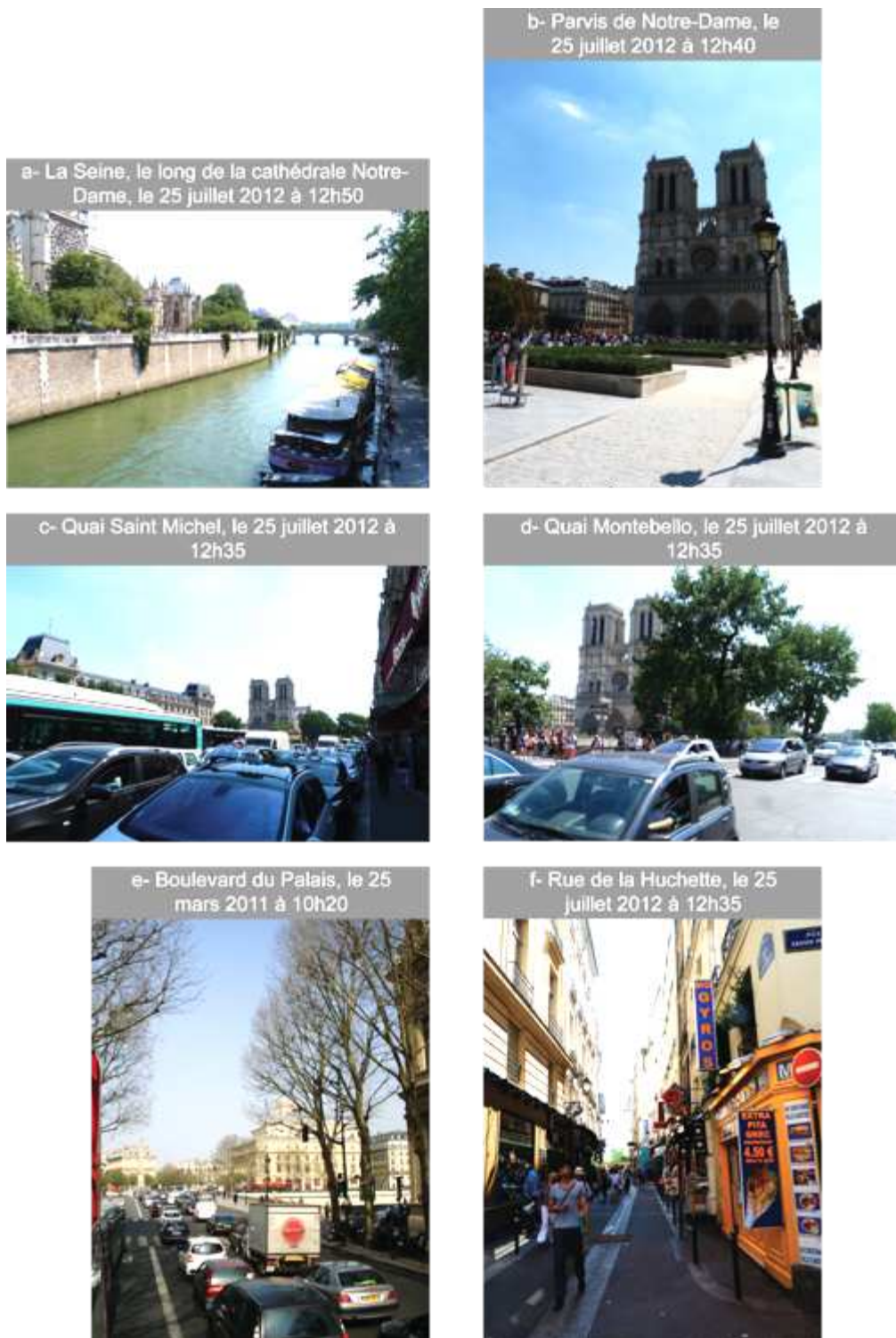


Figure X.6 : Photographies du site de Notre Dame

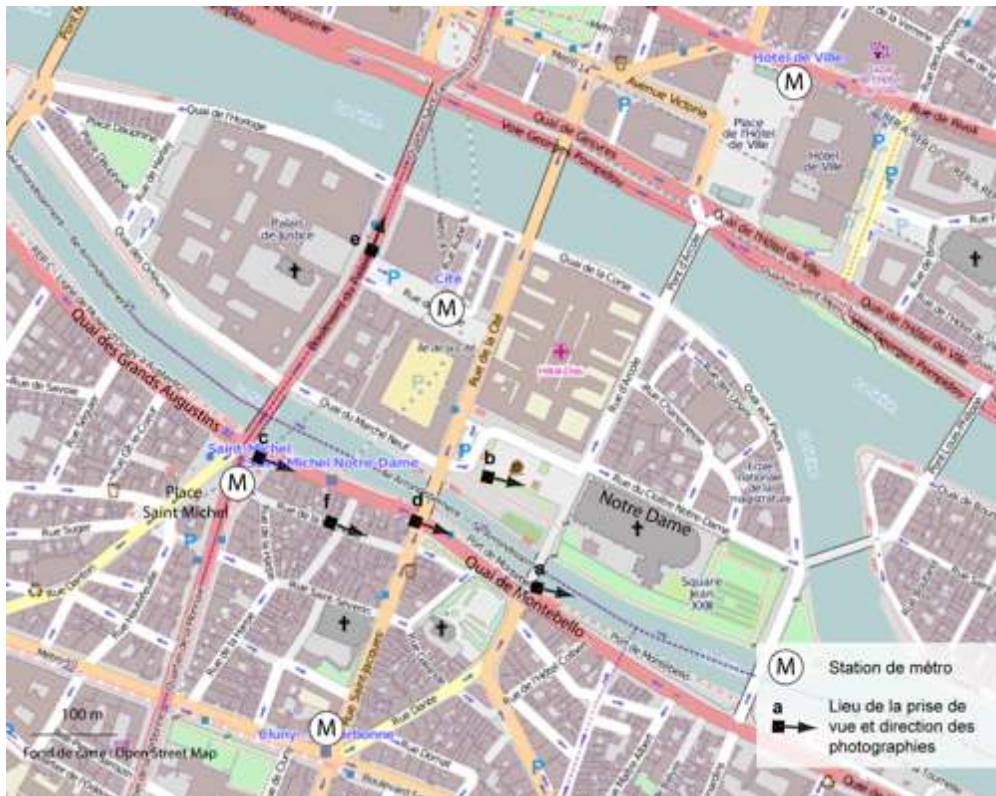


Figure X.7 : Site de Notre-Dame avec les points et les directions des prises de vue des photographies ;
source du fond de carte : OpenStreetMap

Le site du Sacré-Cœur avec une vue sur Paris

Le site du Sacré-Cœur est situé en haut de la Butte Montmartre. La majorité des touristes arrivent au Sacré-Cœur par le métro, station Anvers ou Barbès Rochechouart sur le boulevard de Rochechouart (fig. X.8). Un trafic routier quasi continu est perceptible sur le boulevard, avec des odeurs de pots d'échappement et du bruit. Néanmoins, il a été réaménagé en 2004 et 2005 avec des voies pour bus, une piste cyclable et une allée centrale large avec de la végétation. Un des principaux objectifs était de diminuer la pollution de l'air et les nuisances sonores. Il laisse une impression d'« aération » avec moins de nuisances que sur le boulevard Barbès qui est lui perpendiculaire (fig. X.9 a). Pour monter au Sacré-Cœur, la rue de Steinkerque est la plus fréquentée et la plus touristique. Beaucoup de touristes passent par cette rue assez bruyante, avec un mélange d'odeurs provenant essentiellement des restaurants (fig. X.9 b).

Pour accéder au Sacré-Cœur, les touristes peuvent emprunter les escaliers dans le square Louise Michel (fig. X.9 c), prendre le funiculaire de Montmartre ou emprunter les rues adjacentes. La montée est relativement longue et peut être fatigante. Le square Louise Michel est aéré et très vert. Les jours de beau temps et particulièrement les week-ends, les pelouses sont très fréquentées par les franciliens et les touristes.

Nous avons interrogé les touristes sur les derniers escaliers et le parvis du Sacré-Cœur, face à la vue sur Paris (fig. X.9 d et e). Ce site a été choisi principalement dans l'objectif d'étudier la perception visuelle de la pollution de l'air par les touristes.

Les touristes ont été questionnés sur le site du Sacré-Cœur entre 11h et 16h sur deux journées différentes afin de pouvoir comparer la perception des touristes entre ces deux jours. 44 et 30 enquêtes ont été réalisées. Ce qui n'est pas assez pour en tirer une tendance générale mais elles nous ont permis de dégager quelques hypothèses sur la perception des touristes sur ce site (cf. chapitre XI).

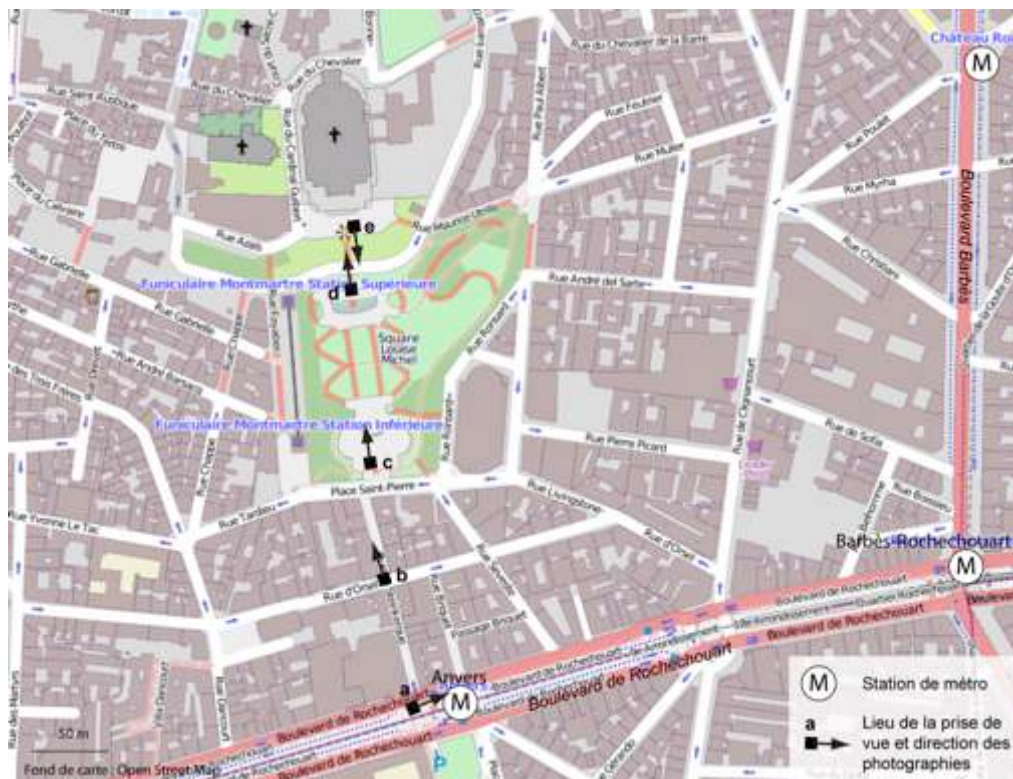


Figure X.8 : Site du Sacré-Cœur avec les points et les directions des prises de vue de prise de vue des photographies ; source du fond de carte : OpenStreetMap

a - Boulevard de Rochechouard à la sortie du métro Anvers, le 25 juillet 2012 à 12h05



b- Montée vers le Sacré-Cœur dans la rue de Steinkerque, le 19 avril 2009 à 15h30



c- En bas du square Louise Michel, le 25 juillet 2012 à 12h00



d- Marche devant le Sacré-Cœur, le 25 juillet 2012 à 11h40



e- Vue de Paris du parvis du Sacré-Cœur, le 25 juillet 2009 à 11h40



Figure X.9 : Photographies du site du Sacré-Cœur

Ce protocole d'enquêtes par questionnaire permet d'apporter des éléments de réponse sur la perception des touristes selon différents facteurs sensoriels, les conditions météorologiques et leur origine géographique. La diversité des lieux d'enquêtes, des jours des mesures et des origines des touristes, et les difficultés à poser les questions, ne nous permettent pas d'avoir un échantillon bien représentatif des touristes et d'en tirer de grandes tendances. Le traitement des résultats sera essentiellement descriptif en comparant, dans un premier temps, l'exposition des touristes et leur perception, et dans un second temps, en l'étudiant selon leur pays d'habitation.



Chapitre XI

Entre exposition et perception de la pollution atmosphérique par les touristes

L'étude des variabilités spatiale et temporelle des concentrations d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules aux échelles locale et régionale, présentée dans la deuxième et troisième partie de la thèse, permet d'estimer les périodes et les lieux où les touristes sont le plus exposés à la pollution de l'air. Dans ce chapitre, l'exposition des touristes, estimée à l'aide des concentrations mesurées par le réseau de mesures Airparif et des connaissances acquises dans les parties précédentes, est confrontée à la perception de la qualité de l'air des touristes à l'aide des analyses des enquêtes de terrain.

Ce chapitre a pour objectif de répondre aux questions suivantes : *Leur perception de la qualité de l'air est-elle différente selon les conditions météorologiques et donc les niveaux de pollution ? L'environnement des sites touristiques influe-t-il sur la perception de la qualité de l'air par les touristes ? Perçoivent-ils différemment la pollution de l'air selon les modes de transport qu'ils utilisent ? Quels sont les facteurs qui expliquent les écarts entre l'exposition et la perception des touristes ?*

Pour y répondre, la perception de la qualité de l'air par les touristes sera étudiée selon les jours et les heures dans une première partie. Dans une seconde partie, nous verrons la différence de perception entre les différents sites et dans une troisième partie, selon les modes de transport.

XI.1. Une exposition et une perception différentes selon les jours et les heures

Les enquêtes ont volontairement été réalisées durant des jours avec des niveaux de pollution contrastés au cours de l'été et de l'automne 2011. Les touristes étaient donc exposés à une pollution de l'air différente selon les jours d'enquêtes.

XI.1.1. Niveaux de pollution et conditions météorologiques diverses lors des jours d'enquêtes

Le tableau XI.1 présente l'indice ATMO qui permet d'estimer la qualité de l'air à l'échelle régionale et les concentrations moyennes, maximales et minimales d'O₃, de NO₂ et de PM₁₀

mesurées par la station Paris 18^{ème}. La qualité de l'air était « mauvaise » les 27 et 28 juin due à l'O₃, et « médiocre » le 21 octobre due au PM10. Les autres jours, la qualité de l'air est « bonne ».

TAUX DE POLLUANTS (µg/m ³) en niveau de fond - Paris 18 ^{ème}												
	JOURS	INDICE ATMO	POLLUANTS de l'indice ATMO	O ₃			NO ₂			PM10		
				Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy
JUIN	lundi 27	7	O ₃	184	0	86	67	16	39	54	19	33
	mardi 28	7	O ₃	164	25	87	91	13	38	53	25	38
JUILLET	jeudi 7	3	O ₃	63	18	51	35	6	15	27	11	18
	samedi 9	3	O ₃	74	6	55	71	7	19	25	7	12
	dimanche 10	4	O ₃	79	0	39	91	12	43	32	12	22
AOÛT	jeudi 11	4	O ₃	83	4	55	54	7	21	25	10	16
	vendredi 12	2	O ₃ NO ₂ PM10	49	16	33	31	6	18	12	6	10
OCTOBRE	vendredi 21	6	PM10	38	1	12	187	33	81	153	19	55
	samedi 22	4	PM10	22	0	7	66	29	45	40	29	35

Tableau XI.1 : Qualité de l'air durant les jours d'enquêtes de terrain en juin, juillet, août et octobre 2011, source données : Airparif

Le 27 et le 28 juin 2011, les concentrations d'O₃ étaient exceptionnellement fortes avec des maxima horaires dépassant le seuil de recommandation et d'information de 180 µg/m³ entre 14h et 17h dans plusieurs stations franciliennes du réseau Airparif. (cf. chapitre VI). Les maxima d'O₃ étaient compris entre 148 µg/m³ et 210 µg/m³ le 27, et entre 125 µg/m³ et 185 µg/m³ le 28. Dans Paris, le seuil de 180 µg/m³ a été dépassé le 27 et le 28 juin dans les stations situées dans les 6^{ème} et 18^{ème} arrondissements parisiens. Dans la nuit du 27 au 28 juin, des orages ont eu lieu, lessivant la pollution et les taux étaient en moyenne plus faibles à Paris. C'est le seul épisode de pollution qui a eu lieu au cours de l'été 2011. La qualité de l'air était plutôt bonne durant les autres jours.

Du 7 juillet au 9 juillet 2011, l'indice ATMO est égal à 3 et à 4 le dimanche 10 juillet dû à l'O₃. Le maximum horaire d'O₃ est en effet un peu plus élevé le dimanche, mais la moyenne journalière est plus faible que les autres jours. A l'inverse, les taux de NO₂ sont plus forts en moyenne le dimanche que les deux autres jours. Les concentrations de NO et de NO₂ mesurées dans les stations trafic du boulevard périphérique et de la place Victor Bash augmentent en début de matinée du 9 juillet s'expliquant exceptionnellement par des départs en vacances. Les faibles vents (vitesse inférieure à 1,5 m/s à Paris Montsouris) et une inversion thermique ont empêché la dispersion des polluants.

Le jeudi 11 août, l'indice ATMO est de 4 dû à l'O₃. Les concentrations d'O₃ augmentent dans la matinée avec un niveau d'équilibre stable, autour de 80 µg/m³, entre 12h et 19h, mesuré à la station de fond Paris 18^{ème}. Le 12 août, la qualité de l'air est très bonne avec un maximum d'O₃ à 49 µg/m³. Les concentrations de NO₂ et de PM10 sont faibles durant ces deux jours : les moyennes sont de 18 µg/m³ le 27 et 21 µg/m³ le 28, pour les NO₂, et de 10 µg/m³ le 27 et 16 µg/m³ le 28.

Le vendredi 21 octobre 2011, les concentrations de PM10 et de NO₂ sont élevées avec un pic entre 7h et 9h durant les heures de pointes: maximum des taux de PM10 de 153 µg/m³ et maximum des taux de NO₂ de 189 µg/m³ mesurés à 8h à la station Paris 18^{ème}. Les taux de PM10 et de NO₂ diminuent à partir de 9h et sont plus faibles l'après-midi (entre 33 µg/m³ et 60 µg/m³ pour les PM10 et 20 µg/m³ à 36 µg/m³ pour le NO₂ entre 12h et 19h). Le samedi 22 octobre, les concentrations sont beaucoup plus faibles que la veille (tab. XI.1).

Nous avons vu dans la partie précédente que les niveaux de pollution de l'air mesurés à une échelle locale dépendaient beaucoup des niveaux de pollution de fond de l'agglomération parisienne. Les touristes sont donc le plus exposés à la pollution de l'air les 27 et 28 juin, et le 21 octobre. Nous supposons qu'ils peuvent aussi se faire un avis sur la qualité de l'air durant les jours précédents l'enquête. Néanmoins, lorsque nous leur demandons leur avis sur la qualité de l'air, la perception des touristes, et surtout des étrangers, est transitoire : ils semblent répondre en y réfléchissant à l'instant t. A l'inverse, certains touristes français, semblent répondre à travers leur représentation forgée à long terme. Cet aspect est détaillé dans le chapitre suivant.

XI.1.2. Variabilité des perceptions selon le jour et les heures des enquêtes

La figure XI.1 présente les résultats à la question « *Pensez-vous que l'air de Paris est pollué ?* » et à la question « *Ressentez-vous des nuisances environnementales à Paris ?* » auxquelles les touristes répondaient par « *oui* » ou par « *non* ». Quelque soit la journée, la grande majorité des touristes répond que la ville de Paris est polluée. À la seconde question posée sur les nuisances, les touristes sont beaucoup plus mitigés : ils sont entre 50% et 60% à répondre positivement. Quelques touristes affirment donc que l'air de Paris est pollué mais ils ne ressentent pas de nuisances vis-à-vis de cette pollution. À l'inverse, des touristes disent ressentir des nuisances environnementales à Paris mais ils estiment que l'air de Paris n'est pas pollué.

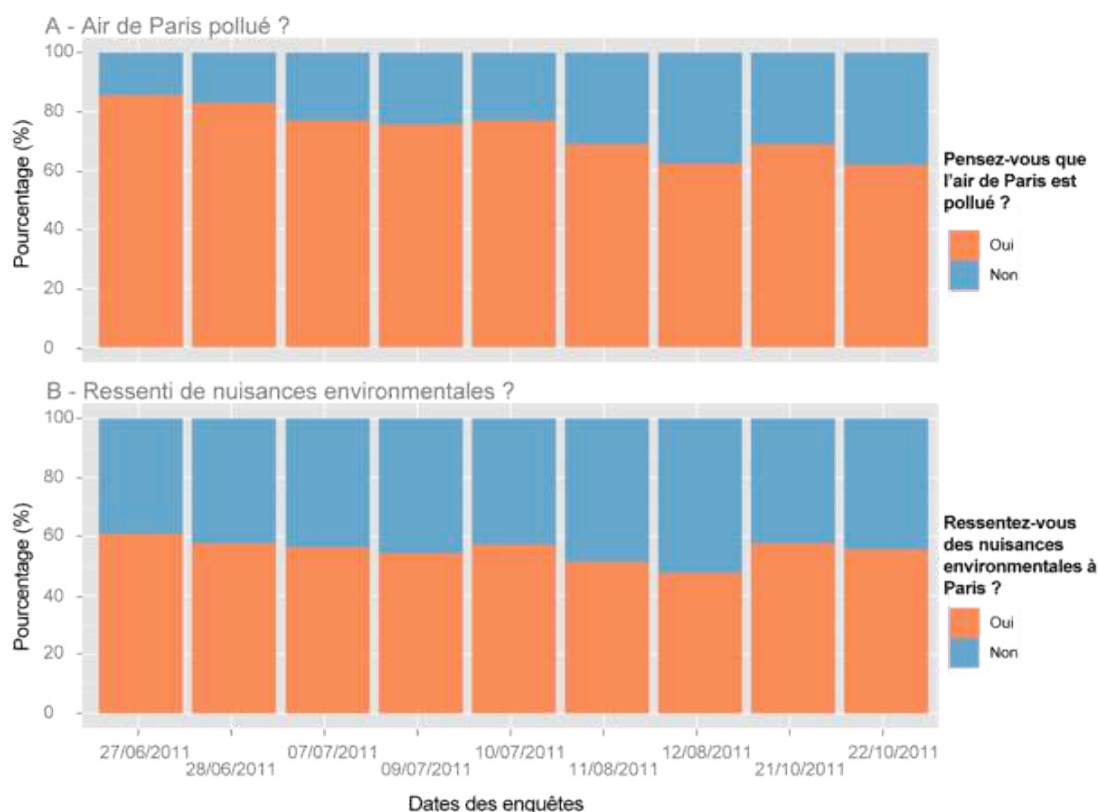


Figure XI.1 : Réponses des touristes à la question « Pensez-vous que l'air de Paris est pollué ? » (A) et à la question « Ressentez-vous des nuisances environnementales à Paris ? » (B) selon les jours d'enquêtes

Nous avons demandé aux touristes s'ils ressentaient des nuisances au cours de leur séjour : « odeurs désagréables », « visibilité réduite », « irritation du nez », « irritation des yeux », « difficultés respiratoires » ou « grande fatigue ». La question suivante était « quel(s) étai(en)t le/les facteur(s) de ces symptômes ? » en leur proposant un choix multiple : « bruit », « météo », « pollution de l'air », « propreté de la ville », « autre », « je ne sais pas ». 43% des touristes ont répondu que la pollution de l'air était la source des symptômes ressentis, souvent en même temps que le bruit (56% des touristes). 23% nous ont répondu que ces symptômes étaient liés au métro et 18% à la propreté de la ville. 9% des touristes ont proposé les odeurs comme source des nuisances ressenties. Quelques réponses ont été plus originales telles que l'alcool ou trop de fêtes. 34% nous ont dit ne pas savoir quelle était l'origine de ces symptômes, qui correspondaient majoritairement à ceux qui ne disaient ressentir aucune nuisance à Paris.

Variabilité de la perception de la qualité de l'air selon les jours

Les facteurs de nuisances appréciés par les touristes varient d'un jour à l'autre, tout comme, la proportion de touristes estimant que l'air est pollué à Paris. Le 27 et le 28 juin 2011, plus de 80% des 90 touristes interrogés ont considéré que la ville de Paris est polluée. Le pourcentage de touristes affirmatifs est légèrement plus faible en juillet mais avoisine aussi les 80%. Les jours des enquêtes en été et en octobre 2011, entre 62% et 69% des 350 touristes interrogés estiment

que la ville de Paris est polluée. Cette variabilité est moins marquée pour les réponses à la question sur les nuisances environnementales. Le dimanche 9 juillet et les deux jours en août, les touristes ont proportionnellement ressenti moins de nuisances que durant les autres jours d'enquêtes. Quelques touristes français qui séjournaient chez des amis ou dans leur famille nous ont dit que « *le mois d'août était tranquille à Paris puisque les parisiens n'y étaient pas* ». Ce qui est connu de certains Français et surtout des Franciliens : "*Les gens s'étonnent toujours que vous ne quittiez pas Paris l'été, sans comprendre que c'est précisément parce qu'ils le quittent que vous y restez*" (Henry de Montherlant).

Nous avons demandé aux touristes de noter précisément la qualité de l'air qu'ils estimaient, de 1 (« *très bonne qualité de l'air* ») à 10 (« *qualité de l'air médiocre* »). La majorité des touristes estime que la qualité de l'air est de « *très bonne* » à « *moyenne* » (de 1 à 5). Même s'ils considèrent que l'air de Paris est pollué, une grande partie estime que la qualité de l'air est relativement bonne à Paris, ce qui correspond à la réalité dans l'année selon l'indice ATMO : en 2011, 36% des indices ATMO étaient à 3, 30% à 4 et 20% à 5 donc relativement bonne dans l'ensemble. La grande majorité des touristes a sous-estimé la pollution de l'air les jours de pics de pollution selon l'échelle objective de l'indice ATMO car la pollution de l'air n'était pas désagréable pour eux. Dans leur représentation de l'échelle de notation, le maximum égal à 10 peut signifier une qualité de l'air extrêmement mauvaise comme celle, par exemple, à Pékin qui est montrée fréquemment dans les journaux internationaux. Des touristes venant de Mexico et de Moscou nous ont dit par exemple que la qualité de l'air était très bonne à Paris par rapport à leur ville et surtout la pollution était beaucoup moins visible.

La notation de la qualité de l'air est variable d'un jour à l'autre. Le 27 juin et le 10 juillet 2011 sur le site du Sacré-Cœur, la qualité de l'air est notée la plus mauvaise. Le site est un facteur explicatif de la perception des touristes sur la qualité de l'air et sera développé dans le détail dans la partie suivante.

En juin, le 10 juillet et le 21 octobre 2011, les touristes ont en moyenne estimé une qualité de l'air moins bonne que les autres jours, tous sites confondus. La majorité des touristes ont noté la qualité de l'air de moyenne à très mauvaise le 27 et le 28 juin 2011 (de 5 à 10), ce qui correspondait à la réalité. Le 21 octobre, 42% des 65 touristes interrogés ont estimé la qualité de l'air de moyenne à très mauvaise. Deux touristes français ont estimé la qualité de l'air médiocre (10) car ils avaient vu un panneau de la ville de Paris informant sur le pic de pollution. Nous avons cherché à comprendre si les facteurs sensoriels pouvaient expliquer la variabilité des perceptions d'un touriste à l'autre.

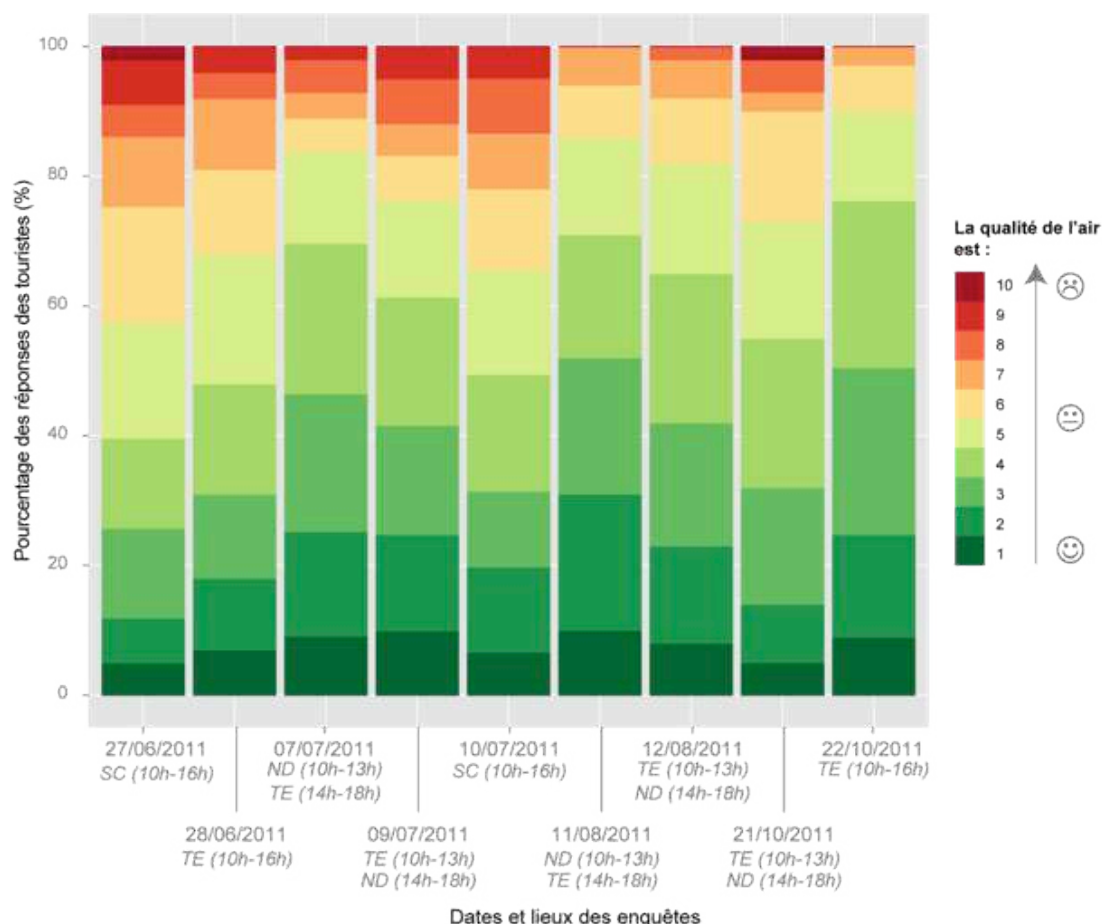


Figure XI.2 : Réponses des touristes à leur estimation de la qualité de l'air à Paris selon les jours d'enquêtes

Perception de la qualité de l'air selon sa visibilité ?

La figure XI.3 présente des photographies prises le 27 juin, le 12 août et le 21 octobre à partir du site Earthcam. Ce site regroupe des webcams en direct placées dans le monde entier. Nous avons utilisé les images issues de la webcam du site Earthcam qui est placée sur un balcon avec une vue sur la Tour Eiffel. Les photographies ne sont pas prises à la même heure, avec une réflexion du soleil différente, mais elles permettent d'avoir un aperçu du ciel durant les enquêtes en juin, août et octobre. La couche de pollution d'O₃ est bien visible le 27 juin 2011 (fig. XI.3 a). Sur le site du Sacré-Cœur où les touristes avaient une vue sur Paris, la couche était bien visible le matin et un peu moins l'après-midi à cause de l'ensoleillement. En juillet et en août, le ciel était nuageux sans couche de pollution visible (fig. XI.3 b). Le 21 octobre au matin, une couche grisâtre pouvait être observée (fig. XI.3 c).

Un tiers des touristes estiment que la visibilité est réduite « *de temps en temps* » et « *souvent* » le 22 octobre, ce qui est supérieur aux autres jours (entre 11 et 13% pour les autres jours). Le 22 octobre et dans une moindre mesure, le 21 octobre, du brouillard était présent en fin de nuit et début de matinée. Les personnes qui séjournaient en banlieue parisienne, où le brouillard était

plus dense, ont majoritairement répondu que la visibilité était réduite. Le 27 juin, un cinquième des 44 touristes interrogés a estimé une visibilité réduite et nous pouvons émettre que la moitié de ces touristes a perçu la couche de pollution à l'ozone dans la matinée.



Figure XI.3 : Vue de la Tour Eiffel à partir d'une webcam Earthcam ; source : www.earthcam.com

Ressenti physique de la pollution de l'air ?

La figure XI.4 présente le pourcentage de touristes selon les jours et l'échelle des réponses à la question « *Au cours de votre séjour à Paris, avez-vous ressenti plus que d'habitude une irritation des yeux (A) et une irritation du nez (B) ?* ». Fin juin, les touristes ont ressenti proportionnellement une irritation des yeux et du nez plus importantes que les autres jours (fig. XI.4 A et B). Cependant, les touristes ressentant ces symptômes n'ont pas tout le temps évalué une qualité de l'air mauvaise. Par exemple, sur les 24% le 27 juin et les 26% qui ont ressenti une irritation des yeux, 61% et 52% ont estimé une qualité de l'air de moyenne à très mauvaise. De plus, à la question « *Selon vous ces symptômes et nuisances (irritation des yeux, du nez, fatigue, odeurs désagréables), peuvent être dus :* », uniquement 59% et 44% ont fait le lien entre la pollution de l'air ressentie et les irritations des yeux ou du nez. Ces symptômes d'irritations ont aussi été perçus les 21 et 22 octobre 2011. Les fortes concentrations de particules et de dioxyde d'azote ont pu provoquer ces symptômes pour quelques touristes, principalement à proximité de la circulation routière où les taux étaient certainement plus élevés (cf. partie II). Néanmoins, les deux ne sont pas forcément liés : les températures étaient plus froides en cette période de l'année provoquant plus de rhumes par exemple.

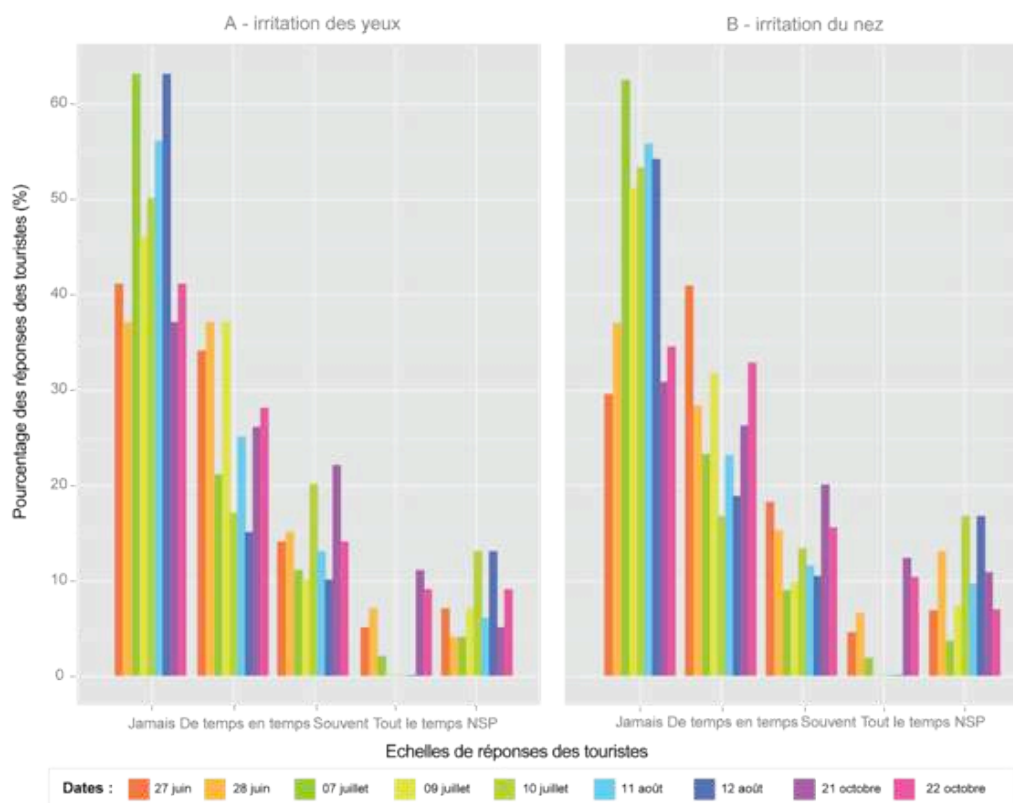


Figure XI.4 : Réponses des touristes à la question « Au cours de votre séjour à Paris, avez-vous ressenti plus que d'habitude une irritation des yeux (A) et une irritation du nez (B) ? » selon les jours des enquêtes.

Nous n'avons pas représenté graphiquement les autres symptômes proposés dans notre questionnaire car ils ne montraient pas de variations selon les jours. 15% de touristes rencontrés ressentaient des « *difficultés respiratoires* » tous les jours confondus mais pas plus pendant les épisodes de pollution. Le pourcentage de touristes se sentant fatigués varie peu (environ 15% répondent « *De temps en temps* », « *souvent* »), sauf le 27 juin et le 10 juin sur le site du Sacré-Cœur que nous traiterons ensuite.

Cependant, nous avons pu observer une variabilité de la fatigue au cours de la journée. La majorité des touristes interrogés se sentant fatigués ont répondu au questionnaire l'après-midi, dont 38% entre 16h et 18h des 366 touristes questionnés sur le site de Notre-Dame et de la Tour Eiffel. À partir de ce résultat, nous nous sommes demandé si la pollution de l'air est plus ressentie dans l'après-midi que le matin. Sur le site de Notre-Dame, la qualité de l'air est estimée moins bonne quand les enquêtes sont réalisées le matin par rapport à l'après-midi. À l'inverse, la qualité de l'air est perçue meilleure quand les enquêtes ont été faites à la Tour Eiffel l'après-midi. Les touristes sont plus gênés par les nuisances à Notre-Dame l'après-midi quand ils sont fatigués que sur le site de la Tour Eiffel.

Variabilité des perceptions selon les conditions météorologiques ?

La figure XI.5 représente la perception des touristes sur le temps et les températures durant leur séjour à Paris. Les jours des enquêtes ont été regroupés par mois. Globalement, la majorité des touristes a trouvé que le temps et les températures étaient corrects ou agréables durant leur séjour à Paris. Cependant, un plus grand nombre de touristes a trouvé qu'ils étaient très désagréables ou désagréables en juin et en août que pour les autres mois. Durant le mois d'août, le ciel est couvert avec quelques précipitations et du vent allant jusque 7 m/s. Les températures sont comprises entre 19°C et 25°C la journée à Paris Montsouris. Le temps n'est donc pas très agréable pour l'été. Il n'y a cependant pas de lien significatif entre les personnes qui ont répondu que la qualité de l'air était médiocre ou mauvaise et ceux qui ont trouvé que le temps et les températures étaient désagréables.

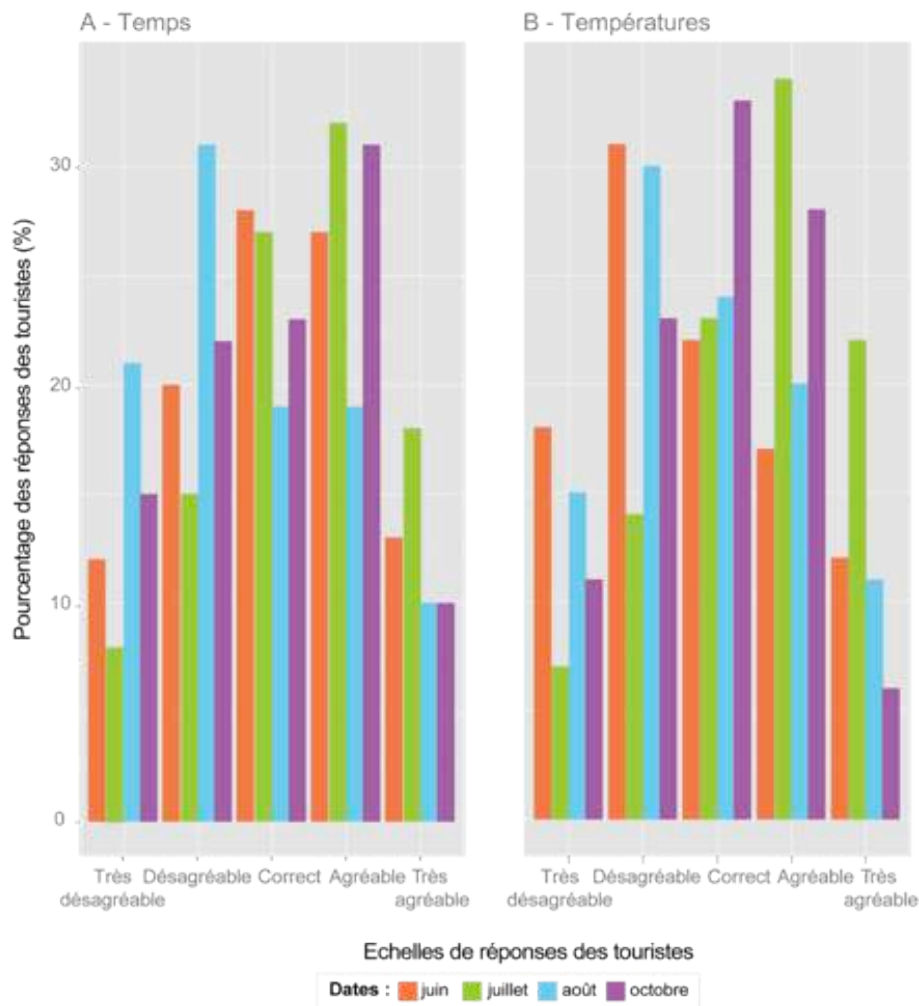


Figure XI.5 : Réponses des touristes à la question « Durant votre séjour, le temps est (A) et la température est (B) ? » selon les mois des enquêtes.

Au mois de juin, la moitié des touristes a estimé que les températures étaient désagréables ou très désagréables. Le 27 juin, les températures mesurées à Paris Montsouris étaient comprises

entre 26°C et 36°C entre 10h et 18h. Le 28 juin, les températures sont légèrement plus faibles, entre 26°C et 33°C. Les taux d'humidité étaient entre 26% et 53% le matin. Les trois quart des touristes ont estimé que la qualité de l'air était de médiocre à très mauvaise (indice de 6 à 10) et en même temps, que les températures étaient désagréables ou très désagréables. Lors des épisodes de pollution à l'O₃, les températures sont fréquemment élevées (*cf.* chapitre VI) et peuvent être gênantes pour la population locale et les touristes. La « météo » a été choisie par 78% des touristes comme une source de symptômes à leur gêne durant ces deux jours : les conditions météorologiques étaient ressenties comme une nuisance. Par ailleurs, quelques touristes nous ont dit sur le site du Sacré-Cœur l'après-midi, lorsque les températures étaient très élevées, que « ça puait ». Les odeurs de la rue de Steinkerque et des restaurants de la place des Tertres à côté du Sacré-Cœur étaient, en effet, très fortes, et de notre point de vue, plus désagréables que lors des enquêtes réalisées le 10 juillet.

Les variabilités de perception observées selon les jours s'expliquent aussi par les différences de sites sur lesquels nous avons fait nos enquêtes.

XI.2. Variabilité des perceptions et de l'exposition sur les trois lieux touristiques

Nous avons choisi trois sites touristiques distincts, parmi les plus visités à Paris, en émettant l'hypothèse que les touristes percevraient peut-être différemment la pollution de l'air ou la qualité de l'air selon les différents sites touristiques.

La figure XI.6 présente la perception des touristes de la qualité de l'air selon les lieux touristiques. La qualité de l'air est la moins bien perçue sur le site du Sacré-Cœur. Les enquêtes ont été réalisées le 27 juin et le 10 juillet. La qualité de l'air était mauvaise le 27 juin, mais similaire à celle du 28 juin où la qualité de l'air a été jugé meilleure par les touristes sur le site de Notre-Dame et de la Tour Eiffel. Les niveaux de fond de pollution n'expliquent pas une si grande différence entre les sites. Cette partie présente la variabilité des perceptions selon les sites.

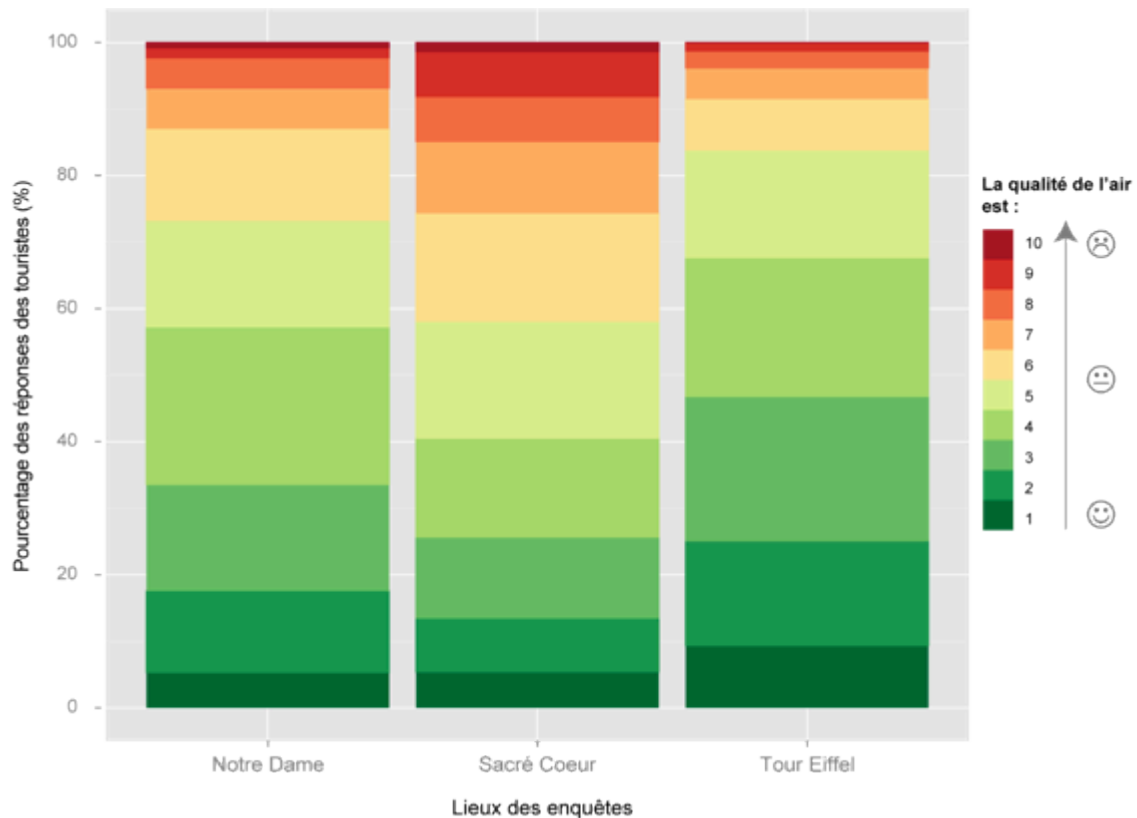


Figure XI.6 : Estimation des touristes de la qualité de l'air à Paris selon les lieux des enquêtes

XI.2.1. Le Sacré-Cœur, un site pollué ?

L'exposition des touristes à l'O₃, au NO₂, aux PM₁₀ et PM_{2,5} n'est *a priori* pas plus élevée sur le site du Sacré-Cœur que sur les autres sites. Les enquêtes de terrain ont été réalisées sur le parvis et les escaliers en contre bas du Sacré-Cœur (*cf.* chapitre X). C'est un site très ouvert avec peu de sources d'émission de NO₂ ou de PM à proximité directe, puisque le trafic routier est très faible autour du Sacré-Cœur. Nous avons mesuré les concentrations de PM₁₀ et de PM_{2,5} le 27 juin entre 14h et 16h. Les taux de PM₁₀ étaient équivalents à ceux mesurés en fond par la station Airparif Paris 18^{ème} : 35 µg/m³ en moyenne sur les deux heures, mesuré par le capteur Dustmate et 32 µg/m³ en moyenne, mesuré à la station Airparif. Nous émettons l'hypothèse que les niveaux de PM₁₀, PM_{2,5}, de NO₂ et d'O₃ correspondent plus à un niveau de fond que de proximité du trafic sur le site du Sacré-Cœur. Les concentrations d'O₃ peuvent être élevées sur le site du Sacré-Cœur car les sources d'émissions des NO_x sont éloignées. Par ailleurs, nous ne pouvons pas prendre en compte uniquement l'exposition des touristes à l'instant t où nous avons réalisé les enquêtes mais il est nécessaire de considérer leur trajet pour y arriver car leur perception a pu être influencée.

59% des 74 touristes questionnés estiment que la qualité de l'air est de moyenne à très mauvaise sur le site du Sacré-Cœur. Comme nous l'avons vu précédemment, les enquêtes ont été réalisées le 27 juin et le 10 juillet 2011. La qualité de l'air a été mieux perçue le 10 juillet que le 27 juin, ce qui correspond aux mesures objectives de la pollution de l'air.

Ce site avait été choisi pour sa vue sur Paris (fig. XI.7). La figure XI.8 présente les résultats aux questions : « *Au cours de votre séjour à Paris, avez-vous ressenti plus que d'habitude une grande fatigue (A), une visibilité réduite (B), des difficultés respiratoires (C) et des odeurs désagréables (D) ?* ». Le graphique B représente les réponses des touristes sur la visibilité. Moins de touristes ont répondu que sur les autres sites, qu'« *ils ne savaient pas* », car ils avaient une vue sur Paris au moment de l'enquête. La visibilité est estimée plus réduite de « *temps en temps* » à « *souvent* » pour 33% des touristes. Le 27 juin, la majorité des touristes estime que la visibilité était réduite alors que le smog photochimique était bien visible. Il est difficile d'en déduire que les touristes étaient gênés par la visibilité lors du smog photochimique. D'autant plus que seulement 44 enquêtes ont été réalisées le 27 juin et 30 le 10 juillet. Cette question sur la visibilité est, par ailleurs, difficile pour les touristes car beaucoup ne connaissent pas la vue ou ne s'en souviennent pas. Ils n'ont donc aucun élément de comparaison pour savoir si la visibilité est réduite ou non. Toutefois, à la question suivante « *Selon vous ces symptômes et nuisances (irritation des yeux, du nez, fatigue, odeurs désagréables), peuvent-être dus :* », les trois quart des personnes qui trouvaient que la visibilité était réduite le 27 juin ont répondu « *à la pollution de l'air* ». Ils savaient donc que la pollution de l'air pouvait diminuer la visibilité et/ou être visible lors de smog photochimique. Le 10 juillet, les réponses à la question sur les facteurs des symptômes et nuisances sont plus variables et nous ne pouvons en tirer de conclusions. Nous noterons par ailleurs que sur le site de la Tour Eiffel, la visibilité a été estimée réduite plus souvent. Ce qui s'explique essentiellement par les enquêtes réalisées le 22 octobre, jour avec du brouillard le matin.

Les touristes ont été proportionnellement plus nombreux à dire qu'ils ressentaient des difficultés respiratoires et une grande fatigue au cours de leur séjour sur le site du Sacré-Cœur. Cependant, la moitié seulement les a reliées à la pollution de l'air comme un éventuel facteur mais certains ont dit que la montée des escaliers du square Louise Michel était fatigante et qu'ils arrivaient essoufflés en haut.



Figure XI.7 : Panorama pris du Sacré-Cœur le 27 juillet 2011 à 15h

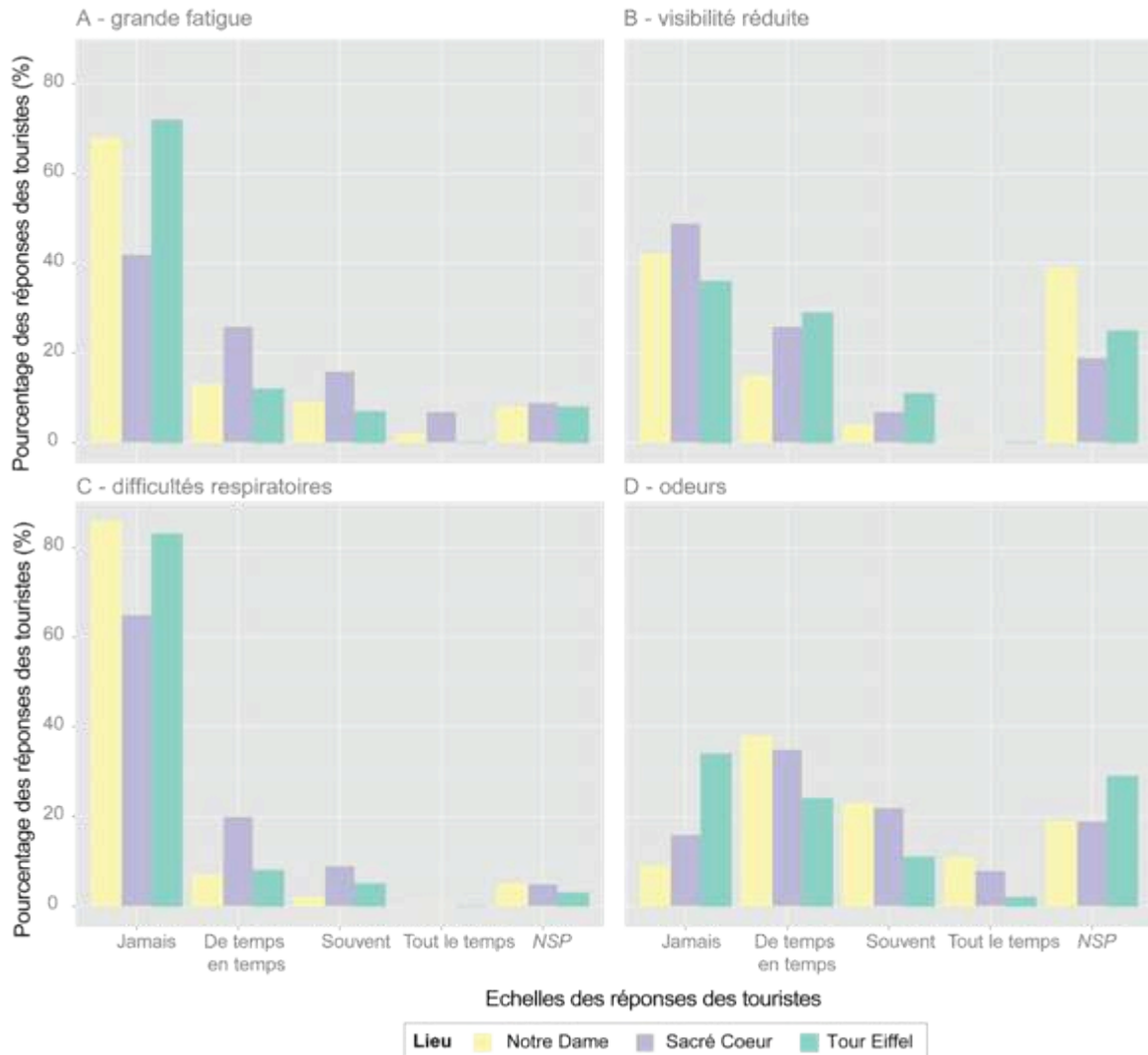


Figure XI.8 : Réponses des touristes à la question « Au cours de votre séjour à Paris, avez-vous ressenti plus que d'habitude une grande fatigue (A), une visibilité réduite (B), des difficultés respiratoires (C) et des odeurs désagréables (D) ? » selon les lieux des enquêtes.

La figure XI.9 présente le ressenti des touristes sur la propreté et le bruit lors de leur séjour. Dans l'ensemble, la grande majorité des touristes estiment que la propreté et le bruit sont de « *correct* » à « *très agréable* » à Paris. Sur le site du Sacré-Cœur et de Notre-Dame, la propreté et le bruit sont estimés plus désagréables que sur le site de la Tour Eiffel. Les touristes ayant estimé que la propreté était « *désagréable* » ou « *très désagréable* » ont généralement noté la qualité de l'air de 5 à 10. Ces mêmes touristes ont coché les odeurs et le métro comme facteur de leur gêne sanitaire ou sensorielle. Nous avons discuté un peu plus avec quelques touristes sur le site du Sacré-Cœur pour avoir plus de précisions. Les touristes, qui arrivaient du boulevard Rochechouart et du métro, évaluaient souvent la qualité de l'air et la propreté moins bonnes que les touristes qui s'étaient promenés dans les rues de la Butte de Montmartre auparavant. Le contraste entre les deux est assez saisissant. Sur le Boulevard Rochechouart, nous croisons le Paris populaire animé avec des magasins aux devantures commerciales bien voyantes, cachant

les bâtiments haussmanniens. La butte de Montmartre a des airs de village avec ses rues pavées, ses petites places, ses maisons et ses vignes (fig. XI.10). C'est un site mondialement connu, vu dans de nombreux films, pour la vie bohème des artistes qui y ont élu domicile, pour ses cafés et ses cabarets. La représentation cognitive des touristes qui viennent sur la butte de Montmartre pour cette ambiance bohème a pu jouer un rôle sur leur perception de la pollution de l'air et des autres nuisances.

Les touristes ont trouvé le site plus bruyant l'après-midi que le matin. Le site était effectivement plus bruyant car un plus grand nombre de touristes était présent. Les résultats sur les nuisances sonores sont similaires sur le site de Notre-Dame.

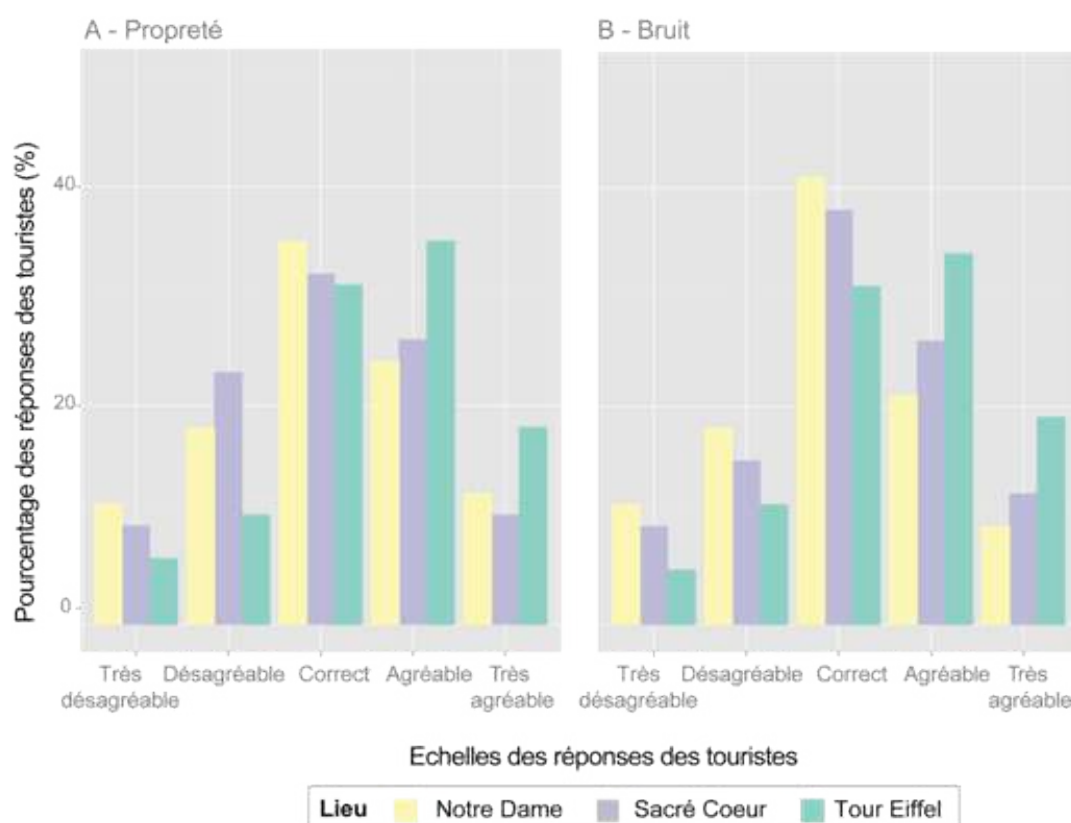


Figure XI.9 : Réponses des touristes à la question « Durant votre séjour, la propreté est (A) et le bruit est (B) ? » selon les mois des enquêtes.

XI.2.2. Les odeurs et le bruit autour de Notre-Dame

Nous avons réalisé les enquêtes sur le parvis de Notre-Dame. Les touristes ne sont pas à proximité immédiate du trafic routier. Cependant, le trafic routier sur le quai Montebello et dans la rue de la Cité peut être une source de pollution et de nuisances sonores. Les mesures réalisées en bus touristique, présentées dans le chapitre IX, montraient des taux de PM10 et de PM2,5 plus faibles sur l'Île de la Cité que sur les quais de Seine, s'expliquant par la densité du trafic routier. Le flux de trafic est cependant plus dense que sur le site du Sacré-Cœur. Le substrat

terrifiante du parvis de Notre-Dame et la mise en suspension des particules avec des brises, peut être une source de gêne.

La majorité des touristes estiment que la qualité de l'air sur le site de Notre-Dame est bonne ou moyenne. La figure XI.8 D montre que des odeurs désagréables ont été ressenties par 65% des touristes interrogés sur le site au cours de leur séjour. A la question, « *selon vous ces symptômes et nuisances peuvent être dus à* » 48% répondent à la propreté de la ville, 41% au bruit, 37% à la pollution de l'air, 35% au métro et quelques touristes ont mentionné les voitures ou le trafic routier. Sur la figure XI.9, les touristes ont moins bien perçu la propreté de la ville que sur le site de la Tour Eiffel. Le bruit est le moins bien évalué sur ce site par rapport aux deux autres. Les touristes ressentent principalement des odeurs désagréables et du bruit, l'après-midi. La qualité de l'air est moins bien notée l'après-midi. Les touristes sont plus nombreux sur le site l'après-midi et il est plus bruyant que le matin. Les restaurants proches de Notre-Dame sentent plus à partir de midi et peuvent être désagréables l'après-midi lorsque les touristes n'ont pas faim. Par ailleurs, les touristes sont peut-être plus fatigués l'après-midi et sont plus facilement gênés.



Rue Cortot



Escalier de la Place des Tertres

Figure XI.10 : Photographies prises à la butte de Montmartre, le 10 mai 2013

XI.2.3. Le site de la Tour Eiffel, un site non pollué ?

Nous avons questionné les touristes sur le parvis de la Tour Eiffel. Comme il a été vu dans le chapitre précédent, le site de la Tour Eiffel est plus aéré et vert que les précédents. Les taux de PM10 et de PM2,5 que nous avons mesurés à vélo et en bus touristique sur les axes autour de la

Tour Eiffel sont plus faibles que sur les autres grands axes parisiens (sur les quais de Seine proche de Notre-Dame par exemple ; cf. chapitre IX). Les mesures d'O₃ réalisées lors d'un pic de pollution comparable à celui du 28 juin 2011, ont indiqué des taux d'O₃ plus forts sur le Champ de Mars, loin de la circulation routière, que proches des grands axes (cf. chapitre VIII). Nous pouvons donc supposer que les concentrations d'O₃ étaient importantes le 28 juin lors des enquêtes réalisées.

Sur le site de la Tour Eiffel, la qualité de l'air est estimée meilleure que sur les deux autres sites (fig. XI.6). A la question « *Ressentez-vous des nuisances environnementales à Paris ?* », 47% des touristes ont répondu « non » sur le site de la Tour Eiffel, 43% sur le site de Notre-Dame et 41% sur le site du Sacré-Cœur. De plus, les nuisances sont perçues comme moins fréquentes et désagréables sauf la visibilité (fig. XI.7 et XI.9). A la question, « *selon vous ces symptômes et nuisances peuvent être dus à* », 48% ont répondu « *ne sais pas* », ce qui est supérieur aux deux autres sites. Le site ouvert, avec beaucoup de végétation et une circulation routière moins dense doit influencer sur leurs réponses. La visibilité est perçue plus réduite sur ce site, d'une part car elle est visible du Trocadéro, et d'autre part car le brouillard était présent les matins des 21 et 22 octobre. Les touristes ont été interrogés avant de monter en haut de la Tour Eiffel. Il aurait été intéressant de connaître leur perception sur la visibilité avant, et après qu'ils soient redescendus. Nous avons essayé avec quelques touristes mais il était malheureusement compliqué de les retrouver ou, eux, de nous retrouver une à plusieurs heures, après leur montée. Les nuisances et la pollution de l'air sont moins bien évaluées sur les sites de Notre-Dame et du Sacré-Cœur que sur le site de la Tour Eiffel. Cependant, comme les enquêtes ont été faites uniquement sur une centaine de personnes par site et des jours différents, il faut rester prudent sur ce résultat. Les différences de perception entre les jours et entre les sites indiquent que les touristes sont influencés par l'environnement lorsqu'ils répondent. Pour la plupart, ils ne connaissent pas ou peu Paris et donnent donc une réponse selon leurs connaissances transitoires, c'est-à-dire selon leurs observations à court terme. Leur mode de transport a aussi pu influencer leur perception de la pollution de l'air à court terme.

XI.3. Modes de transport et lieu de résidence

Selon les types de mode de transport, l'exposition est différente comme nous l'avons vu brièvement dans le chapitre IX. De plus, les touristes ne font pas les mêmes distances tous les jours selon leur lieu de résidence. Ils peuvent être plus fatigués et gênés par les nuisances quand ils viennent de la banlieue parisienne par exemple.

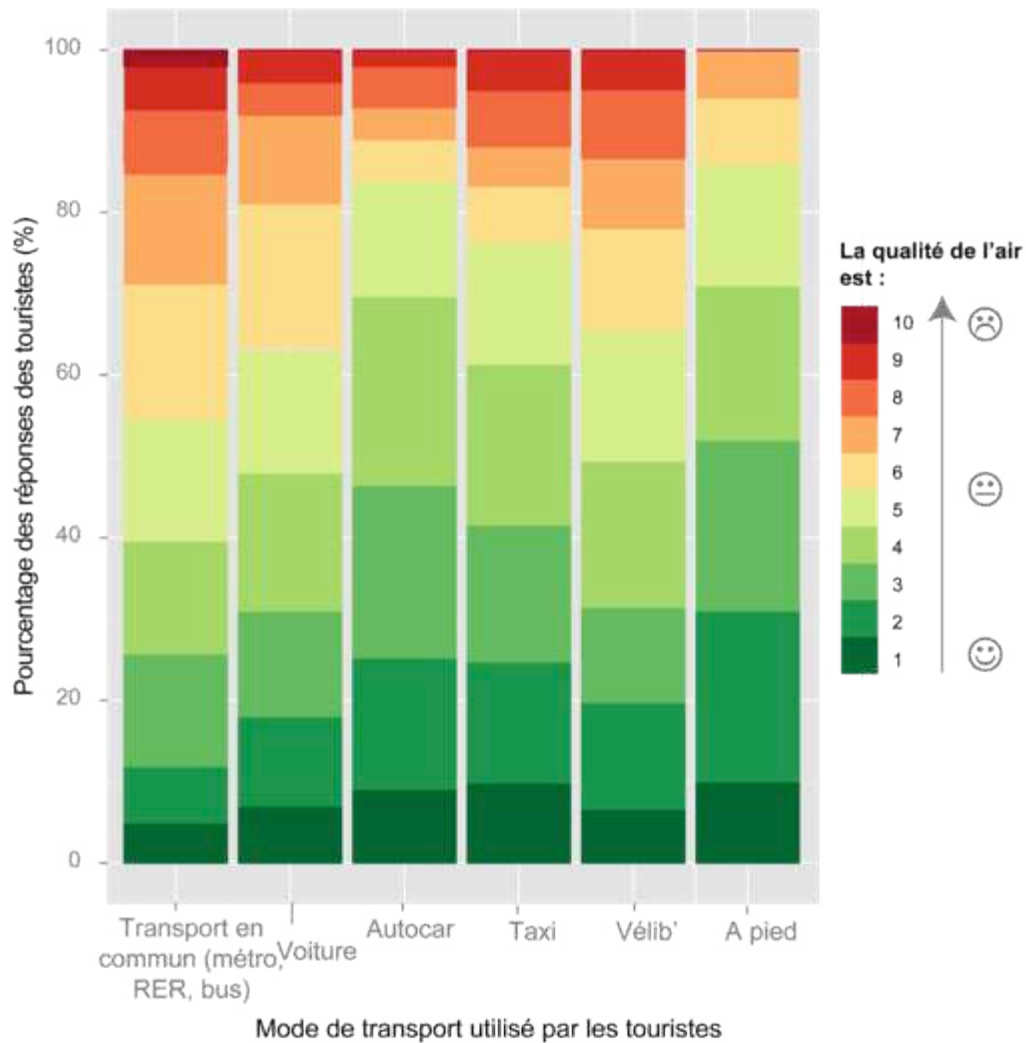


Figure XI.11 : Réponses des touristes à leur estimation de la qualité de l'air à Paris selon les modes de transport utilisés par les touristes dans Paris

Nous avons questionné les touristes sur leur mode de logement : 47% des touristes logeaient à l'hôtel, 29% logeaient dans leur famille ou chez des amis, 14% dans un appartement loué, 6% dans une chambre chez l'habitant et 4% au camping. Le lieu de logement des touristes ne semble pas avoir influé sur la perception de la pollution de l'air à Paris. Le 22 octobre, les touristes venant de banlieue ont été plus nombreux à répondre que la visibilité était réduite. Ce qui s'explique par un brouillard plus dense en s'éloignant du centre de l'agglomération parisienne.

Nous avons demandé aux touristes, dans les informations générales, quels moyens de transport ils ont utilisés pour se déplacer dans Paris. Les touristes avaient la possibilité de répondre plusieurs modes de transport : voiture (36%), car touristique (21%), taxi (19%), transport en commun (73%), vélo (13%) ou à pied (26%). La figure XI.11 présente la représentation des touristes de la qualité de l'air selon le mode de transport utilisé. Tous sites et jours confondus, un quart des 440 touristes a répondu que le métro était un facteur de nuisances. Par ailleurs, les touristes discutaient volontiers du métro en disant que « *c'était fatigant* », qu'« *il y avait beaucoup de monde* » et que « *ça sentait mauvais* ». Les touristes se déplaçant à vélo ont moins

bien estimé la qualité de l'air mais ils se déplaçaient pour la plupart aussi en transport en commun. Il est donc difficile d'en déduire quelque chose de représentatif. En autocar, à l'inverse, la qualité de l'air estimée est une des meilleures. Les touristes se déplaçant en autocar, souvent confortable et climatisé, vont de site touristique en site touristique avec moins de nuisances ressenties à l'extérieur puisqu'il passe du temps à l'intérieur de l'autocar.

Les touristes estiment donc majoritairement une qualité de l'air bonne ou moyenne, correspondant à la plupart des situations durant lesquelles nous avons réalisé nos enquêtes. Ils ont perçu différemment la qualité de l'air selon les jours : la qualité de l'air a été jugée plus mauvaise lors de l'épisode de pollution à l'O₃ en juin 2011 que les autres jours. Différents facteurs ont pu jouer sur la perception quelque soit le jour : principalement, les conditions météorologiques et la visibilité réduite due au smog photochimique et au brouillard en octobre. L'environnement des sites a lui aussi influé sur la perception de la qualité de l'air. Les touristes interrogés sur le site de la Tour Eiffel perçoivent une meilleure qualité de l'air que ceux sur le site de Notre-Dame et sur le site du Sacré-Cœur. Les facteurs qui influent sur la perception quelque soit le site sont la propreté du site, les nuisances sonores et les odeurs. Les touristes utilisant le métro ont par ailleurs une moins bonne vision de la qualité de l'air parisienne. Ces résultats sont à prendre avec précaution car moins de 60 touristes ont été interrogés chaque jour et ils avaient des origines différentes. Le chapitre suivant traite des différences de perception des touristes selon leur nationalité.



Chapitre XII

Représentation de la qualité de l'air par les touristes à Paris

La perception sensorielle de chaque individu de sa propre exposition à la pollution de l'air, vue dans le chapitre précédent, varie d'un individu à l'autre selon les connaissances de l'individu sur le sujet par son éducation, son accès à l'information et la médiatisation. Ces paramètres vont dépendre pour tous les touristes de critères socio-économiques mais aussi de leur culture et de leur sensibilisation à la problématique de la pollution de l'air dans leur pays d'origine. L'objectif de cette partie est de savoir si la perception de la qualité de l'air à Paris varie selon l'origine géographique des touristes, en répondant aux questions suivantes : *Quelles sont les différences entre la perception de la qualité de l'air chez eux et à Paris ? La qualité de l'air à Paris est-elle perçue pareillement selon leur nationalité et leur région d'origine ? Si oui, comment expliquer ces différences ?* Les différences de perception de la qualité de l'air et des nuisances des touristes français et des touristes étrangers seront étudiées dans un premier temps. Puis, nous approfondirons le sujet en regardant d'une part, la représentation des français et d'autre part, celle des étrangers.

XII.1. Des différences de perception observées entre les touristes français et les touristes étrangers

46% des touristes interrogés étaient français. Sans même avoir analysé les résultats des enquêtes, nous nous sommes vite aperçus que les touristes français percevaient différemment la qualité de l'air que les touristes étrangers. Les touristes français étaient plus critiques vis-à-vis de la pollution de l'air et des nuisances à Paris que les touristes étrangers qui semblaient pour la plupart plus enthousiastes d'être à Paris. Par ailleurs, les touristes français semblaient faire appel à des connaissances à plus long terme que leur séjour sur la pollution de l'air parisienne. Par exemple, certains touristes répondaient « bien sûr, la ville de Paris est polluée » comme s'il s'agissait d'une évidence pour eux. Les réponses étaient différentes pour les touristes étrangers qui semblaient plus y réfléchir à l'instant présent, durant quelques secondes, avant de répondre.

La figure XII.1 présente la qualité de l'air estimée par les touristes français et étrangers à Paris et dans leur ville. La qualité de l'air est moins bonne à Paris, pour les touristes français que pour les étrangers. Dans leur ville de résidence, la qualité de l'air est jugée meilleure qu'à Paris. 81% des touristes français ont noté une qualité de l'air égale ou moins bonne à Paris que dans leur ville. Ces résultats vont dans le même sens que ceux publiés en 2010 par l'Observatoire régional d'Ile-de-France (Grange *et al.*, 2010) : les provinciaux évaluent dans l'ensemble, une meilleure qualité de l'air chez eux que les Franciliens en Ile-de-France. Les touristes français estiment aussi moins de nuisances chez eux qu'à Paris, mais cela est moins marqué que pour la qualité de l'air (fig. XII.2).

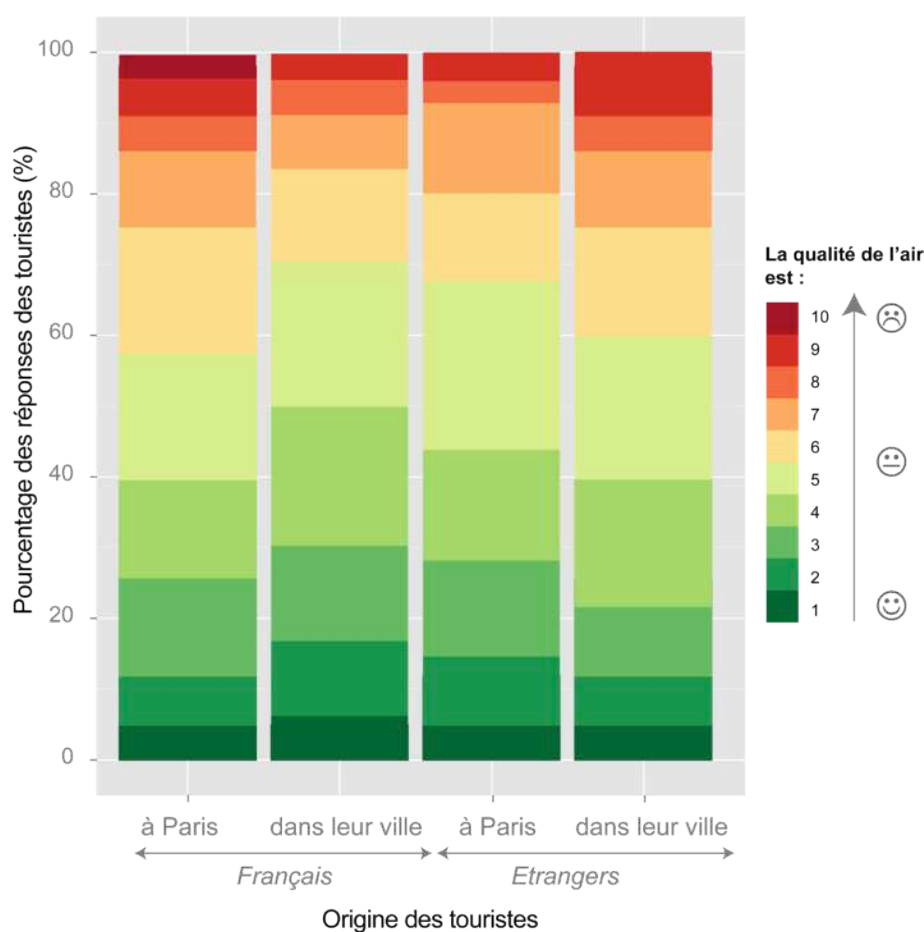


Figure XII.1: Réponses des touristes à leur estimation de la qualité de l'air à Paris selon l'origine des touristes

A l'inverse, les touristes étrangers ont souvent apprécié une meilleure qualité de l'air à Paris, que sur leur lieu de résidence, sauf pour quelques exceptions et des personnes venant de petites villes ou de régions peu polluées (par exemple, des Scandinaves). Leurs réponses sur l'air de Paris pollué et la qualité de l'air parisienne étaient clairement sur le court terme. A long terme, ils faisaient appel à la représentation de la pollution de l'air qu'ils avaient chez eux. Par exemple, une hollandaise nous a répondu que l'air de Paris était forcément plus pollué que chez eux car ils

habitaient dans une petite ville à côté d'Amsterdam. A l'inverse, le même jour, un touriste venant de Mexico nous a répondu que la qualité de l'air chez lui était très désagréable en comparaison de Paris. Ils ont tous les deux été interrogés le 27 juin 2011 alors que la qualité de l'air était médiocre.

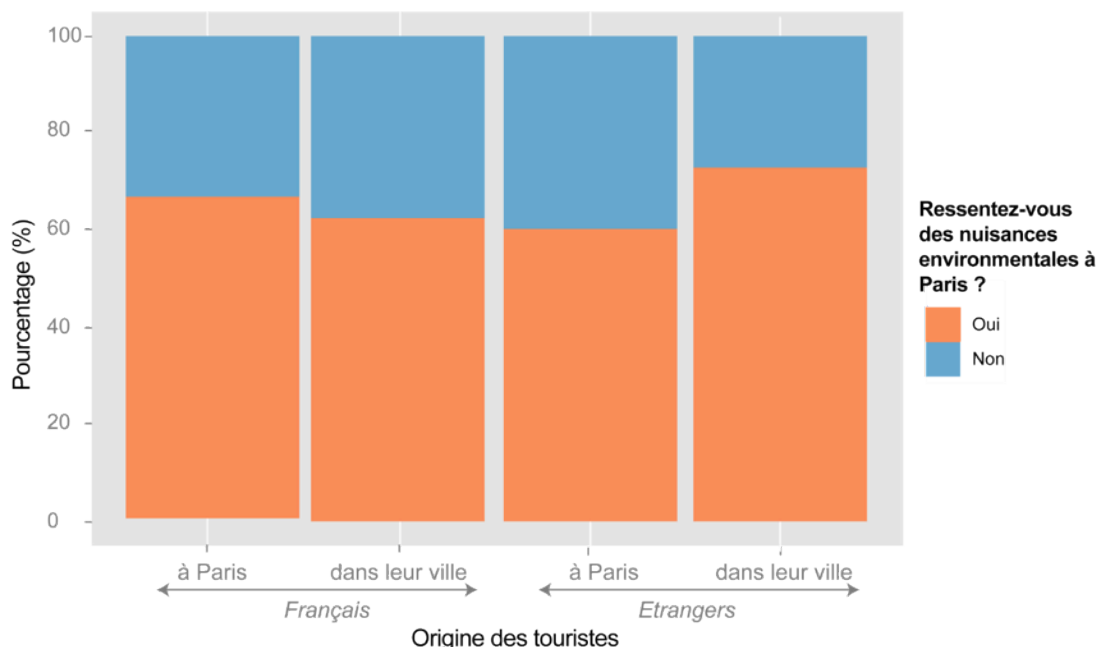


Figure XII.2 : Réponses des touristes à la question « Ressentez-vous des nuisances environnementales à Paris ? » selon l'origine des touristes

Au vu de ces résultats un certain nombre de questions se dégagent : *La qualité de l'air est-elle moins bonne en région parisienne que dans les autres régions françaises ? Pourquoi les touristes étrangers évaluent-ils une meilleure qualité de l'air ? Comment expliquer ces résultats ? Existent-ils des différences de perception au sein des français et des étrangers ?* Pour y répondre, nous allons d'abord étudier les touristes français puis les touristes étrangers. Nous émettrons des hypothèses pour expliquer cette différence de perception entre les touristes français et étrangers puis nous regarderons les différences au sein de chaque groupe.

XII.2. La qualité de l'air moins bien perçue par les français ?

La qualité de l'air a été moins bien perçue globalement par les touristes français que par les étrangers. Nous avons, dans un premier temps, cherché à savoir objectivement si la pollution de l'air est plus importante dans l'agglomération parisienne que dans les autres agglomérations françaises. Puis, quelques hypothèses seront proposées pour expliquer cette perception de la qualité de l'air. Nous verrons enfin qu'il existe des différences entre les touristes selon leur région, leur sexe et leur âge.

XII.2.1. La qualité de l'air moins bonne en région parisienne que dans les autres agglomérations françaises ?

L'ADEME réalise chaque année un bilan de la qualité de l'air en France à partir de l'indice ATMO et disponible sur le site Buldair (ADEME, 2011 ; <http://www.buldair.org/>). Le nombre de jours par an, par indice de qualité de l'air ATMO, est comptabilisé : par exemple, en 2010, 296 jours avaient un indice ATMO compris entre 1 et 4 à Paris, 281 jours à Marseille. Cet indice ATMO est difficilement comparable d'une ville à l'autre car il prend en compte uniquement un seul polluant par jour, celui avec les niveaux moyens en situation de fond les plus élevés du jour (cf. chapitre II). Deux agglomérations différentes peuvent donc avoir une qualité de l'air médiocre le même jour mais à cause de deux polluants différents. Les indices de qualité sont aussi analysés selon les périodes saisonnières : période estivale (du 1^{er} avril au 30 septembre) et hivernale (du 1^{er} octobre au 31 mars). En période estivale, les villes autour du pourtour méditerranéen ont un plus grand nombre de jours avec une qualité de l'air médiocre et mauvaise que les autres villes françaises à cause de l'O₃. En période hivernale, la qualité de l'air est la moins bonne dans le nord et l'est de la France, particulièrement à cause des PM₁₀. Les mêmes études peuvent être réalisées en Europe à partir de l'indice d'AirQualityNow (<http://www.airqualitynow.eu>). Il est difficile de comparer les agglomérations entre elles à partir de cet indice. Il faudrait avoir la possibilité d'étudier les données issues des stations du réseau des ASQAA. Cependant, en France, au vu des indices qui sont calculés et réajustés à partir des stations du réseau des ASQAA installés selon les mêmes critères, la qualité de l'air en région parisienne ne semble pas plus mauvaise que d'autres grandes agglomérations car les conditions météorologiques sont plutôt favorables à la dispersion de la pollution de l'air.

Nous avons interrogé 26 touristes venant des agglomérations de Marseille, Toulon et Nice au cours de l'été 2011. Ils ont évalué une qualité de l'air entre 1 et 5 dans leur ville, et ils ont tous évalué la qualité de l'air parisienne moins bonne. Les seules exceptions sont deux touristes qui habitaient à Marignane et Vitrolles, à côté de l'étang de Berre et de l'aéroport de Marseille, et qui estimaient que la qualité de l'air chez eux était, à juste titre, plus mauvaise qu'à Paris. Nous avons discuté, le 27 juin au Sacré-Cœur, avec un groupe de jeunes (entre 21 et 24 ans) venant de Nice. Le garçon du groupe qui a répondu à nos questions avait noté la qualité de l'air de 2 pour Nice et de 7 à Paris. Ils nous ont ensuite expliqué qu'à Paris « *ça puait* », qu'il y avait trop de bruit et de monde, qu'ils se sentaient enfermés ; alors qu'à Nice, « *la présence de la mer permettait d'éviter la pollution de l'air* ». La thèse de Nicolas Martin intitulée « *La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen: les Alpes-Maritimes* » montre bien que la ville de Nice est sujette à des épisodes de pollution à l'O₃ fréquents en période estivale. Un homme de 57 ans venant aussi de Nice a été interrogé le vendredi 12 août à la Tour Eiffel. Il a estimé une qualité de l'air de 4 pour Paris et de 3 pour Nice. Cependant, il nous a dit ne pas avoir

de problèmes d'asthme depuis qu'il était arrivé à Paris, alors qu'il en avait fréquemment à Nice. Il ne pensait cependant pas que son asthme à Nice pouvait être lié à la qualité de l'air de la ville. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a publié en 2011 des données de taux moyens annuels de PM10 pour des agglomérations de plus de 100 000 habitants dans le monde entier. Les données sont issues de différentes bases de données. Les données pour les pays appartenant à l'Union Européenne sont issues de la base de données Airbase (the European Air quality dataBase ; <http://acm.eionet.europa.eu/databases/airbase/>). En France, les moyennes ont été réalisées sur l'année 2008 à partir d'une ou plusieurs stations de fond urbaines, stations de fond périurbaines ou stations trafic pour toutes les agglomérations supérieures à 100 000 habitants. En classant les moyennes annuelles de PM10, la ville de Paris arrive en tête des villes françaises avec une moyenne annuelle de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, suivie d'Antibes ($34 \mu\text{g}/\text{m}^3$) puis de Lyon et Nice ex-æquo ($33 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le classement a été publié sur des sites internet français tel que l'*Internaute magazine*. Cependant, comme le précise l'OMS, ces données ne sont pas comparables : les mesures des PM10 sont différentes selon les pays, les moyennes ont été réalisées sur un nombre de stations de fond et trafic différent et les années des moyennes sont variables. Par exemple, la moyenne de l'agglomération parisienne a été réalisée avec une station de fond urbaine et trois stations trafic. La moyenne de PM10 de $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Marseille a été réalisée à partir de données mesurées dans deux stations de fond urbaines, deux stations de fond périurbaines et une station trafic. Nous avons vu dans le chapitre V que les taux de PM10 sont plus élevés dans les stations trafic que dans les stations de fond. Il est donc normal que l'agglomération parisienne ait un taux moyen plus élevé que Marseille.

Le quotidien français *Le Monde* a publié en septembre 2011 un article intitulé « Nouvelle alerte de l'OMS sur la pollution de l'air : les infections respiratoires causeraient plus de 2 millions de décès par an, selon l'Organisation Mondiale de la Santé ». Dans cet article, une carte est publiée à partir des données de l'OMS. La seule ville française qui est indiquée est Paris (fig. XII.3), pouvant laisser l'impression au lecteur que c'est la ville française la plus polluée, d'autant plus que les autres villes citées ne sont pas toutes des capitales. Dans ce même quotidien, le 3^{ème} quotidien le plus lu en France, la pollution de l'air est souvent traitée à partir de la situation en Chine et, en France, à Paris. En recherchant le terme « pollution de l'air » dans le moteur de recherche du journal, « Airparif » arrive en quatrième position des propositions pour « Affiner la recherche ». Beaucoup d'articles du *Monde* se basent en effet sur les rapports et les alertes d'épisodes de pollution d'Airparif. La figure XII.4 indique les résultats du moteur de recherche du quotidien *Le Figaro*, le 2^{ème} quotidien le plus lu en France, par lieu, afin d'affiner la recherche sur « pollution de l'air ». 49 articles portent sur Paris et 38 sur l'Île-de-France, ce qui est bien supérieur aux autres régions françaises. La pollution de l'air en région parisienne est donc très médiatisée par rapport aux autres régions françaises, ce qui peut influencer la perception de la

pollution de l'air des touristes français. Par ailleurs, les illustrations des articles sur la pollution de l'air en France sont souvent parisiennes. *Le Monde* a publié en septembre 2011 un article intitulé « Des polluants industriels aux transports : la pollution de l'air a changé de nature » avec une photographie de Paris durant un épisode de pollution spectaculaire, sans préciser lequel, l'heure et le jour de la photographie (fig. XII.5). Les provinciaux peuvent donc arriver à Paris avec des images très négatives de la pollution de l'air qu'ils ont vues dans les médias. Les niveaux de pollution en fond ne sont pas forcément plus élevés à Paris que dans d'autres agglomérations françaises, mais la pollution de l'air parisienne est beaucoup plus médiatisée que dans les autres régions de France. Les médias étrangers parlent peu de la pollution atmosphérique à Paris.

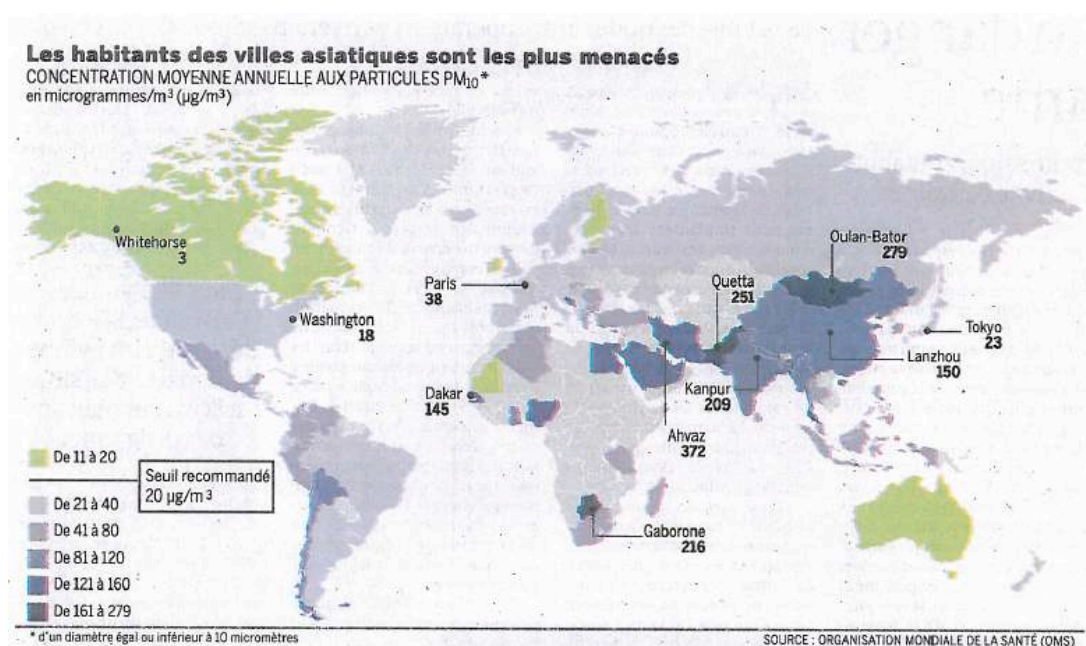


Figure XII.3 : Moyennes annuelles de PM10 pour quelques grandes villes mondiales réalisées à partir des données de l'OMS, source : *Le Monde*, 27 septembre 2011

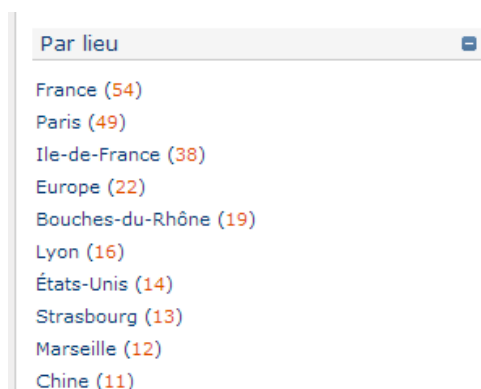


Figure XII.4 : Proposition du moteur de recherche du *Figaro* pour affiner la recherche sur « pollution de l'air », source : *Le Figaro*, recherche effectuée le 12 octobre 2012



Figure XII.5 : Illustration de l'article « Des polluants industriels aux transports : la pollution de l'air a changé de nature » paru le 29 septembre 2011 dans *Le Monde*

La région parisienne est la région la plus densément peuplée avec 11,8 millions d'habitants et une densité de 976 habitant/km², bien devant le Nord-Pas de Calais qui est la deuxième région métropolitaine la plus dense (325 habitant/km²). Sa densité de population et ses nombreuses activités peuvent être une source de nuisances pour tous les provinciaux qui ont l'habitude de villes plus petites. La figure XII.6 est extraite du magazine *Destination* intitulé « Paris : la plus belle ville du Monde », les photographies montrent « Paris champêtre » dans les parcs, et sur les bords de Seine, loin « des avenues bruyantes et polluées ». Par ailleurs, le monde présent dans les rues et dans les transports en commun peut aussi être une source de gêne. L'ensemble des nuisances à Paris (le bruit, les odeurs, la population nombreuse, *etc.*) expliquent certainement que les touristes français ressentent plus de nuisances à Paris que dans leur ville par rapport aux étrangers.



Paris champêtre : loin des avenues bruyantes et polluées, le passé de Paris ressurgit et la ville sait alors se faire bucolique.

Figure XII.6 : Extrait de l'article « Paris en Seine, au long du fleuve capitale » dans le magazine *Destination* n°10 titré « Paris : La plus belle ville du Monde »

Enfin, alors que les touristes étrangers répondaient avec enthousiasme sur leur séjour parisien et la qualité de l'air perçue, les français étaient beaucoup plus négatifs. La majorité logeait chez des amis ou dans leur famille. Ils n'étaient pas à Paris essentiellement pour la ville, contrairement aux touristes étrangers. La figure XII.7 présente un dessin réalisé le 1^{er} mars 2013

et publié dans le *Courrier International* suite à des articles parus dans la presse anglo-saxonne sur le pessimisme des français à partir de sondages réalisés en 2011 par les instituts de sondages BVA et Gallup International (Brody, 2013 ; Doward, 2013 ; Stanley, 2013). Ces articles n'ont aucun lien direct avec la perception de la qualité de l'air parisienne, mais ils traitent de l'insatisfaction quotidienne des français que nous avons ressentie lorsque nous leur demandions leur avis sur la pollution de l'air parisienne. Ce qui explique aussi, peut-être, qu'ils aient jugé une moins bonne qualité de l'air à Paris que les touristes étrangers.

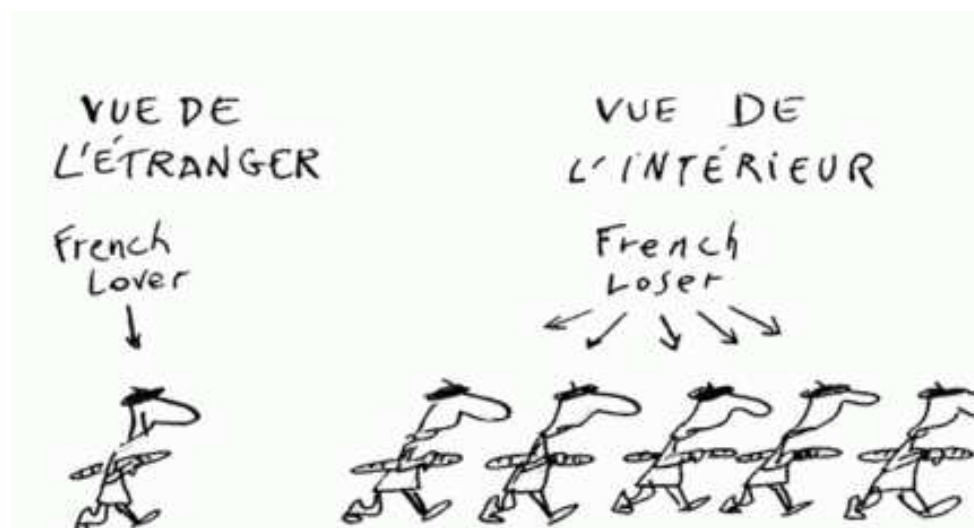


Figure XII.7 : Dessin de Cécile Bertrand, Belgique, paru dans le *Courrier International* du 1^{er} mars 2013

XII.2.2. Des différences observées chez les touristes français

82% des 201 touristes français interrogés disaient venir d'agglomérations françaises (« villes comprises dans une unité urbaine de plus de 100 000 habitants » selon la définition de l'INSEE) et le reste de petites villes ou villages français. Cependant, quelques touristes semblaient nommer la grande ville la plus proche de chez eux. Il est donc difficile de savoir s'ils habitaient plus en ville, en périphérie ou à la campagne. Les touristes qui venaient de petites villes ou villages ont tous estimé une bonne qualité de l'air chez eux, et moins bonne à Paris (de 4 à 7). Les personnes qui ont estimé une qualité de l'air égale ou moins bonne que celle de Paris venaient majoritairement du nord de la France (Lille, Valenciennes, Arras, Dunkerque), certainement à cause de l'image industrielle de leur région.

Nous souhaitions savoir s'il existait une variabilité des perceptions de la qualité de l'air de leur ville d'origine, et de celle de Paris, selon la région et/ou ville d'origine des touristes. Aucune conclusion ne peut être faite sur ce sujet : notre échantillon par agglomération est trop faible (15 personnes de l'agglomération marseillaise, 12 personnes de l'agglomération lyonnaise, 9 personnes de l'agglomération lilloise, etc.), et il existe une variabilité trop importante au sein d'un même échantillon.

À la question, « *Vous sentez-vous concernés par les problèmes environnementaux actuels (changement climatique, pollution de l'air...) ?* », les femmes ont été plus nombreuses à répondre « *beaucoup* » et « *complètement* » que les hommes. Ils semblent qu'elles soient plus sensibles aux questions environnementales. Elles ont été plus nombreuses à répondre que la ville de Paris était polluée et qu'elles y ressentaient des nuisances. Cependant, leur estimation de la qualité de l'air est très variable et ne correspond pas forcément à la réalité.

Les touristes les plus jeunes (entre 18 et 24 ans) sont plus extrêmes dans leur estimation de la qualité de l'air de Paris par rapport à celle perçue dans leur ville. En effet, l'écart entre la qualité de l'air à Paris et dans leur ville est en moyenne de 4,7 pour la tranche d'âge 18-24 ans, alors qu'elle est de 2,8 en moyenne pour les autres tranches d'âge. Cependant, ils ne se disent pas plus sensibilisés aux questions environnementales. Aucune autre tendance n'a pu être mise en évidence.

XII.3. Une diversité de perception chez les touristes étrangers ?

Les touristes étrangers parlaient quasiment tous anglais, laissant penser qu'ils avaient tous un bon niveau d'éducation. Par contre, leur sensibilisation aux questions environnementales était très variable d'un individu à l'autre.

Ils ont globalement estimé une meilleure qualité de l'air à Paris que les touristes français. De plus, ils disaient ressentir plus de nuisances chez eux qu'à Paris. Quand ils venaient de grandes villes, ils estimaient une qualité de l'air similaire ou plus agréable dans la capitale française que sur leur lieu d'habitation, à quelques exceptions. Nous avons cependant observé des différences dans leur perception selon leurs origines géographiques.

XII.3.1. Perception occidentale de la qualité de l'air

Les touristes occidentaux sont les plus nombreux à visiter Paris. Globalement, la qualité de l'air ne semble pas être une nuisance pour eux à Paris et ils l'estiment plutôt bonne ou moyenne : 63% ont noté entre 2 et 5 la qualité de l'air parisienne.

Cependant, nous avons pu observer des différences entre les européens. Les Allemands, Hollandais, Belges et Scandinaves ont souvent estimé une meilleure qualité de l'air chez eux mais la différenciant uniquement de deux points maximum. En discutant plus en détail avec eux, nous avons appris qu'ils habitaient souvent dans de petites villes : par exemple, Örebro ou Gävle en Suède, Amersfoot ou Leiden au Pays-Bas, (*etc.*). Ils ressentaient quelques nuisances dans leur ville mais globalement ils estimaient une bonne qualité générale de l'air. Ces touristes nous ont quasiment tous dit que « *c'était normal* » que l'air de Paris soit un peu plus pollué car ils habitaient dans des villes très vertes. Les Allemands venant de grandes villes telles que Berlin ou Frankfurt ont estimé une qualité de l'air égal à Paris et dans leur ville. 59% de ces touristes se disaient « *Beaucoup* » ou « *Complètement* » concernés par les problèmes environnementaux.

13% nous ont répondu qu'ils n'étaient pas du tout concernés ou qu'ils ne le savaient pas. Ils sont donc certainement sensibilisés aux questions environnementales dans leur pays. Ils ont évalué une qualité de l'air moins bonne que les autres jours, mais il est difficile d'en tirer des conclusions car 13 touristes au maximum provenant du nord de l'Europe ont été interrogés par jour.

Les touristes autrichiens et suisses évaluaient une qualité de l'air meilleure dans leur pays mais ils se sentaient moins concernés par les problèmes environnementaux que les touristes du nord de l'Europe.

Les touristes du sud de l'Europe (Italiens, Espagnols, Portugais) ont évalué globalement une meilleure qualité de l'air à Paris que dans leur ville. Ils provenaient quasiment tous de grandes villes (Rome, Naples, Milan, Madrid, Zaragoza, Porto, Lisbonne, *etc.*). Ils ont tous répondu qu'il y avait des nuisances dans leur ville et ont souvent estimé une qualité de l'air chez eux plus mauvaise (avec des écarts jusqu'à 5 points entre Paris et leur ville). Quelques touristes venaient de plus petites villes mais ils ont estimé une qualité de l'air similaire ou un peu moins bonne à Paris. Par exemple, un touriste italien venant de Pérouse dans le centre de l'Italie a estimé qu'il n'y avait pas de nuisances à Paris contrairement à sa ville, et la qualité de l'air à Paris était égale à 4 comme à Pérouse. Ils se disent par ailleurs moins concernés par les problèmes environnementaux que les touristes du nord de l'Europe.

Les touristes anglo-saxons ont souvent estimé une qualité de l'air similaire à Paris. Les anglais venaient tous de grandes agglomérations (Londres, Manchester, Brighton, Birmingham, Sheffield). La qualité de l'air à Paris a majoritairement été notée entre 3 et 5 et ils ont souvent donné la même note ou jugé la qualité de l'air plus mauvaise dans leur ville. Ce sont les touristes avec lesquels nous avons le moins discuté et qui portaient le moins d'intérêt aux questions environnementales, à trois exceptions. Nous en avons cependant interrogé uniquement 17 donc il est difficile d'en tirer des conclusions.

Nous pensions trouver des différences entre les touristes provenant des États-Unis et ceux qui venaient du Canada. Aucune tendance ne peut être tirée car ils ont répondu très variablement d'un individu à l'autre. Nous pensions aussi que les touristes américains percevaient différemment la pollution de l'air selon leur région de provenance, par exemple une opposition entre les touristes californiens et des métropoles de la côte est, et ceux venant du centre des États-Unis (Texas par exemple). Nous avons interrogé un touriste venant de San Francisco et un touriste habitant à Huston le 11 août 2011 sur le site de la Tour Eiffel. Ils ont tous les deux estimé une qualité de l'air égale à 3 à Paris et un peu plus mauvaise dans leur ville, égale à 5. Globalement, les touristes américains ont mieux estimé la qualité de l'air à Paris que chez eux. Nous avons vu dans le troisième chapitre que les américains étaient très sensibilisés et qu'ils

disposaient de beaucoup d'informations aux États-Unis. Ce qui explique peut-être qu'ils perçoivent une qualité de l'air moins bonne dans leur pays.

XII.3.2. Expérience physique de la qualité de l'air

Certains touristes nous ont répondu que la qualité de l'air était moins bonne chez eux qu'à Paris car ils la ressentaient davantage ou qu'elle était plus visible. Nous avons interrogé quatre touristes mexicains en juillet et en août 2011 alors que la qualité de l'air était particulièrement bonne. Ils ont estimé une qualité de l'air très bonne à Paris (entre 1 et 3), et à l'inverse, médiocre et mauvaise chez eux (entre 6 et 8). Une mexicaine interrogée à la Tour Eiffel, nous disait que l'air était souvent irrespirable à Mexico par rapport à Paris. Un russe de Moscou a été questionné le 27 juin au Sacré-Cœur. Il a noté la qualité de l'air à Paris égale à 3 et égale à 7 à Moscou en regardant le paysage avec le smog photochimique bien visible. Il nous disait que la qualité environnementale à Paris était bien plus agréable que celle à Moscou. Une touriste venant d'Alger, interrogée sur le site de Notre-Dame, le 9 juillet, a estimé que la qualité de l'air était meilleure à Paris qu'à Alger. Puis, elle nous a expliqué que la poussière volait à Alger et que la propreté de la ville y était particulièrement désagréable par rapport à Paris.

A l'inverse, certains touristes venant d'Abidjan et de Varsovie, ont noté une qualité de l'air entre 6 et 9 à Paris, alors que chez eux ils estimaient la qualité de l'air très bonne. Il faudrait étudier plus en détail la pollution de l'air des deux villes, et il aurait fallu s'assurer qu'ils venaient bien des villes et non de villages voisins. Cet écart de représentation de la qualité de l'air parisienne et de leur ville semble assez aberrant mais il s'explique peut-être par un manque d'informations en Pologne et en Côte-d'Ivoire.

XII.3.3. Incompréhension des asiatiques et vision holistique de la pollution atmosphérique

Nous avons eu beaucoup de mal à interroger les touristes chinois et japonais à Paris. Nous leur soumettions le questionnaire en anglais après s'être assuré qu'ils parlaient suffisamment bien la langue. Ils semblaient comprendre les termes utilisés mais les notions de qualité de l'air et de notation semblaient leur poser plus de problème dans leur représentation. Ils avaient du mal à noter la qualité de l'air et ils l'ont majoritairement estimé à 5 que ce soit chez eux ou à Paris. Ils disposent cependant d'une échelle de qualité de l'air similaire à celle des États-Unis (Air Quality Index AQI) au Japon et en Chine (<http://aqicn.org/>). Nous avons interrogé deux touristes venant de Pékin qui ont évalué la qualité de l'air similaire à Paris et à Pékin. Ils ont une vision assez neutre de la qualité de l'air, correspondant certainement à leur représentation holistique de l'environnement (cf. chapitre III).

Par ailleurs, ils se protègent de l'environnement en utilisant des ombrelles ou en se couvrant un maximum (fig. XII.8). Ils limitent aussi la contamination lorsqu'ils sont malades en portant des masques (fig. XII.9). La perception de la qualité de l'air asiatique mériterait d'être approfondie

en étudiant plus en détail leur exposition dans leur pays, le traitement de l'information et leur représentation de la qualité de l'air par rapport à leur environnement en interrogeant les chinois et les asiatiques avec des questionnaires semi-directifs et des questions ouvertes.



Figure XII.8 : Touristes chinois sur le parvis de Notre-Dame, le 25 juillet 2012



Figure XII.9 : Jeunes touristes japonaises à la Tour Eiffel, le 10 octobre 2011

La perception de la qualité de l'air varie donc selon l'origine des touristes. Les touristes français en ont une image plus négative que les touristes étrangers, plus enthousiastes d'être dans la métropole touristique parisienne. L'information et la sensibilisation sur les questions environnementales ont un impact sur leur représentation. La pollution de l'air à Paris est par exemple très médiatisée en France, expliquant en partie la vision négative de la qualité de l'air parisienne des français. Par ailleurs, les touristes sensibilisés à la pollution de l'air dans leur

pays ont tendance à estimer une moins bonne qualité de l'air chez eux qu'à Paris. Leur représentation varie aussi selon leur vision et leur culture des questions environnementales, distinguant ainsi les touristes occidentaux des touristes asiatiques. Ce chapitre soulève un certain nombre de questions sur les différences de représentations selon les pays qui pourraient être plus approfondies dans d'autres travaux.

Conclusion partie IV

Les résultats des enquêtes, réalisées auprès de 440 touristes français et étrangers sur le site de la Tour Eiffel, de Notre-Dame et du Sacré-Cœur au cours de plusieurs journées de l'été et du mois d'octobre 2011, mettent en évidence une variabilité des perceptions selon les jours, les sites, le mode de transport utilisé, et selon l'origine des touristes. Les analyses de ces enquêtes nous ont permis de répondre aux questions posées en introduction :

Est-ce que la perception des touristes est différente de la réalité ?

➡ Estimation selon les jours assez conforme à la réalité

- Estimation d'une qualité de l'air en moyenne qualifiée de "bonne" et de "moyenne" par la majorité des touristes, conforme à la qualité de l'air des jours d'enquêtes.
- Les deux jours avec un épisode de pollution à l'O₃ le 27 et 28 juin 2011, les touristes ont majoritairement estimé la qualité de l'air "moyenne" à "mauvaise", et ont souvent été gênés par des températures trop élevées et une visibilité réduite.
- Durant l'épisodes de pollution aux particules du 21 octobre, la qualité de l'air a été jugée en majorité "moyenne" par les touristes, présentant un écart à la réalité.

➡ Estimation différente selon les sites

- ☹ Sacré-Coeur, qualité de l'air jugée la moins bonne sur ce site, et des nuisances sonores, olfactives et à un sentiment de fatigue sont ressentis.
- 😊 Notre-Dame, qualité de l'air moyenne sur ce site qui peut-être qualifié de bruyant.
- 😊 Tour Eiffel, qualité de l'air jugée la meilleure avec peu de nuisances ressentis sur ce site.

Est-ce que leurs différentes origines et cultures influent sur leur perception ?

➡ Dichotomie entre les touristes français et les étrangers

Touristes français estiment une qualité de l'air moins bonne, ce qui s'explique par :

- ➡ Plus grande médiatisation de la pollution de l'air francilienne que dans le reste de la France
- ➡ Pessimisme français
- ➡ Plus de nuisances à Paris

Touristes français estiment une meilleure qualité de l'air, mais quelques différences :

- ➡ Entre les touristes européens du nord, plus sensibilisés aux questions environnementales, et ceux du sud.
- ➡ Difficulté de compréhension des touristes asiatiques (vision holistique)

Conclusion générale et perspectives

Les objectifs de cette thèse sont, d'une part, d'estimer les lieux et les périodes durant lesquels les touristes sont les plus exposés à la pollution de l'air à l'extérieur, et d'autre part, d'évaluer leur perception de la pollution atmosphérique lors de leur séjour en région parisienne.

Pour apprécier l'exposition des touristes, nous avons choisi de nous focaliser sur les polluants actuellement les plus problématiques à l'extérieur en Île-de-France, c'est-à-dire l'ozone, les particules fines et le dioxyde d'azote. L'étude des variabilités spatiale et temporelle des taux de ces polluants est réalisée à deux échelles : régionale et locale. Dans un premier temps, les données horaires et journalières, issues des stations de mesures du réseau automatique francilien de l'association Airparif, ont été analysées du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2012 pour dresser le contexte régional de la pollution de l'air extérieur et étudier plus spécifiquement les épisodes de pollution durant lesquels les touristes sont les plus exposés. Dans un second temps, des campagnes de mesures des taux de particules et d'ozone ont été réalisées sur plusieurs itinéraires touristiques dans le centre parisien et selon différents modes de transport (bus, vélo, péniche et à pied) pour étudier la variabilité spatiale à une échelle locale.

Les résultats de ces deux premières parties permettent de confronter l'exposition estimée des touristes à la perception des touristes dans une troisième partie. Cette dernière est évaluée à l'aide d'enquêtes de terrain réalisées auprès de 400 touristes d'origine française et étrangère sur neuf journées entre juin et octobre 2011, et sur trois sites touristiques majeurs de la capitale (Sacré-Cœur, Notre-Dame et Tour Eiffel). L'analyse de ces enquêtes met en évidence des différences entre la réalité de la qualité de l'air et la perception de celle-ci par les touristes. Nous avons relié ces différences à leurs perceptions sensorielles ainsi qu'à leur représentation cognitive variable selon leur pays. Enfin, les résultats de ces enquêtes permettent d'estimer si la pollution de l'air est ressentie comme une

nuisance par les touristes et si elle peut être un frein à leur retour dans la métropole.

L'étude des variabilités spatiale et temporelle de la pollution de l'air à l'échelle **régionale** met essentiellement en évidence les périodes durant lesquelles la population et les touristes sont les plus exposés à la pollution de l'air. En effet, les niveaux de pollution augmentent (ou diminuent) de façon relativement uniforme en Île-de-France, quelques soient les stations, selon les conditions météorologiques. Cela s'explique par le faible relief de la région parisienne et une certaine homogénéité des émissions qui sont plus denses dans le centre de l'agglomération qu'en périphérie. De mai à septembre, durant la période photochimique, les situations anticycloniques avec un fort ensoleillement et un vent faible (en moyenne inférieur à 2,5 m/s) favorisent des épisodes de pollution à l'ozone durant un à trois jours consécutifs généralement (du 30 juin au 2 juillet 2009 par exemple). D'octobre à avril, les polluants les plus problématiques sont les particules et le dioxyde d'azote. À l'automne, les pics de pollution aux particules et au dioxyde d'azote sont souvent brefs (une journée) durant une situation anticyclonique (avec peu de vent, en moyenne inférieur à 3 m/s). Les épisodes sont plus longs et intenses en hiver et au début du printemps. En période hivernale, des épisodes de pollution aux particules et au dioxyde d'azote ont lieu lors de situations anticycloniques avec des températures froides facilitant les inversions thermiques matinales et de faibles vents (en moyenne, inférieurs à 2 m/s) principalement de sud et de sud-ouest. Ils durent de deux à plusieurs jours consécutifs (par exemple, du 20 au 24 décembre 2007). Sur la période d'étude, de mi-mars à début avril, des épisodes de pollution aux particules ont été très fréquents suite à des situations anticycloniques très stables avec des vents faibles et fréquemment de nord. La population et les touristes sont donc exposés à des niveaux de polluants différents selon les saisons. Les 90 touristes interrogés durant un pic de pollution à l'ozone le 27 et le 28 juin 2011 ont majoritairement estimé que la qualité de l'air était moins bonne que les touristes questionnés au cours de l'été et à la fin octobre 2011. La qualité

de l'air était, en effet, meilleure les jours des enquêtes l'été, mais mauvaise en octobre due à un pic de particules et de dioxyde d'azote. L'épisode de pollution à l'ozone a été associé aux températures élevées, jugées désagréables par la majorité des touristes, ainsi qu'au smog photochimique visible depuis le Sacré-Cœur et la Tour Eiffel. Les enquêtes ne sont cependant pas assez exhaustives pour en déduire si les touristes ressentent plus la pollution de l'air durant les pics de pollution estivaux que le reste de l'année.

À une **échelle locale**, les mesures des concentrations d'ozone et de particules ont mis en évidence une forte variabilité spatiale selon les espaces et la proximité des sources d'émission. Les niveaux d'ozone mesurés le 30 juin et le 1^{er} juillet étaient plus élevés dans les espaces verts que proche du trafic routier et sur les sols artificialisés. Sur le Champ de Mars, la concentration moyenne mesurée était de $166 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un maximum sur une minute de $232 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le 1^{er} juillet. Sur les axes de circulation proches de la Tour Eiffel et sur le Pont d'Iéna, la concentration moyenne mesurée était de $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un maximum sur une minute de $163 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le même jour. L'exposition à l'ozone est plus élevée dans les parcs, alors que beaucoup de parisiens et de touristes viennent courir, s'y détendre et se rafraîchir lors des fortes chaleurs durant les pics d'ozone. Sur le site de la Tour Eiffel, les 46 touristes interrogés sur ou à côté du Champ de Mars le 28 juin ont estimé une qualité de l'air meilleure que les 44 touristes questionnés le jour précédent sur le site du Sacré-Cœur, alors que la qualité de l'air était similaire pendant les deux jours et les concentrations certainement très élevées sur le Champ de Mars. Ce qui s'explique par des différences morphologiques et de nuisances entre les sites : le site de la Tour Eiffel est plus aéré et ombragé que le site du Sacré-Cœur où plus de nuisances sensorielles (bruit, odeurs) ont été ressenties.

À l'inverse, les concentrations de particules sont plus élevées à proximité du trafic routier. Quelque soit le mode de transport utilisé (vélo, bus), ou à pied, les concentrations de particules grossières (entre $2,5 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$) et les particules fines ($<2,5 \mu\text{m}$) sont les plus fortes dans le flux de circulation. Le ratio moyen

entre les particules fines, inférieures à $2,5\text{ }\mu\text{m}$, et les particules inférieures à $10\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$) augmente en s'approchant de la circulation routière car les pots d'échappement émettent des particules plus fines que les autres sources d'émission. Dans les parcs, par exemple, ce ratio est plus faible car les particules sont d'origine terrigène et sont plus grossières. Par exemple, le 28 juin 2010, lors de mesures réalisées à pied, ce ratio était égal à 0,19 dans la rue de Rivoli, proche de la circulation routière et à 0,11 dans le Jardin des Tuileries avec un sol nu. Les touristes sont donc plus exposés aux particules les plus fines lors de trajets en bus et en vélo, proches de la circulation. Les particules les plus fines pénètrent plus profondément dans les voies respiratoires et sont donc plus dangereuses pour la santé. Cependant, les particules mises en suspension par les brises dans les parcs avec des sols nus peuvent être une source de nuisance avec des irritations oculaires. Quelques touristes ressentaient une gêne oculaire ou respiratoire sur le site de Notre-Dame où le sol est similaire à celui du Jardin des Tuileries avec des particules grossières en suspension.

L'analyse des taux de particules selon la morphologie urbaine (entre les rues canyon et les avenues larges) indique des niveaux de particules plus élevés dans les premières que dans les secondes : par exemple, le taux moyen de PM_{10} mesurées dans la rue Royale, rue encaissée, était de $91\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ et il était de $85\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'avenue des Champs Élysées, avenue large et ouverte, le 21 mars 2012 en vélo. Le ratio moyen de $\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$ est plus fort dans les rues canyon. Il est aussi plus élevé en bus touristique au second étage que dans les autres modes de transport : par exemple, il est égal à 0,47 le 25 mars 2011 en bus, 0,33 le 21 mars en vélo et 0,29 le 29 juin à pied. Nous supposons que les particules fines, plus légères, restent plus longtemps en suspension et sont plus facilement transportées par les brises. Cependant, les mesures de particules sont empiriques à cause du capteur utilisé et non exhaustives. Elles mériteraient d'être approfondies.

La qualité de l'air est majoritairement perçue de « bonne » à « moyenne » par les 440 touristes interrogés. Elle a été évaluée, en majorité, moins bonne les jours d'épisode de pollution, particulièrement le 27 et le 28 juin 2011. L'écart entre la

réalité, estimée à l'aide des données issues des stations du réseau de mesures de Airparif et des études aux échelles régionale et locale, et la **perception des touristes** de la pollution de l'air parisien varie fortement d'un site touristique à l'autre. La qualité de l'air est estimée en moyenne moins bonne sur le site du Sacré-Cœur par les 77 touristes interrogés que sur les sites de Notre-Dame et de la Tour Eiffel (respectivement, 130 et 236 enquêtés). Ce site apparaît comme plus bruyant et fatigant que les deux autres, avec une visibilité plus réduite. La montée au site du Sacré-Cœur est perçue assez désagréablement par les touristes, ce qui s'explique par des rues très bruyantes avec un mélange de commerces touristiques et populaires, des odeurs fortes de nourriture et beaucoup de touristes. À l'inverse, le site de la Tour Eiffel est plus aéré et vert. La qualité de l'air est estimée meilleure par les touristes interrogés sur ce site. Sur le site de Notre-Dame, la qualité de l'air est perçue à l'intermédiaire entre les deux mais le site est vu comme bruyant et avec des odeurs désagréables. Quelque soit le site, le métro est souvent cité par les touristes comme une source de pollution de l'air, mais aussi de bruit, de saleté et de fatigue. Ce mode de transport semble dégrader l'image de la ville de Paris mais une étude plus approfondie sur la perception du métro parisien par les touristes devrait être réalisée pour l'affirmer. Il serait, par ailleurs, intéressant de voir si les habitués du métro dans les grandes villes françaises et internationales sont moins gênés par ce mode de transport à Paris, ou s'il est une source de nuisances pour la majorité des touristes. Dans notre étude, les touristes gênés par le métro provenaient aussi bien de grandes villes que de plus petites.

La pollution de l'air est perçue différemment selon l'origine des touristes et il existe une dichotomie entre les touristes français venant de province et les touristes étrangers. La qualité de l'air est globalement perçue meilleure par les étrangers que les Français. Les touristes étrangers semblent émerveillés par la ville de Paris et estiment une qualité de l'air relativement bonne. La qualité environnementale à Paris les dérange moins car ils ne sont pas venus pour son environnement et/ou sont moins critiques que les Français. Des différences selon la provenance et la représentation cognitive des touristes étrangers ont été mises en évidence en analysant les enquêtes. Les touristes d'Europe du nord ont

tendance à estimer une qualité de l'air égale ou meilleure chez eux car ils venaient fréquemment de petites villes. Les européens du sud évaluaient une meilleure qualité de l'air à Paris que chez eux, et les questions environnementales les intéressaient moins. Ce qui s'explique certainement par une différence de médiatisation et d'éducation sur l'environnement dans les pays du nord et du sud de l'Europe. Les touristes japonais et asiatiques ont une représentation différente de l'environnement que les occidentaux, il est donc difficile d'appréhender et de comprendre leur mesure subjective de la qualité de l'air.

Les Français perçoivent une qualité de l'air moins bonne et plus de nuisances dans la capitale que les étrangers, ce qui s'explique par une médiatisation plus importante de la pollution de l'air à Paris que dans les autres régions, par le pessimisme général des Français ainsi que par un nombre de nuisances (sonores et olfactives) plus importantes que dans les autres villes françaises (à cause de la densité de population plus importante). L'image de l'environnement de la ville de Paris semble assez négative pour une majorité de provinciaux interrogés. La représentation de la qualité de l'air en région parisienne pourrait être un frein au retour de certains touristes français, mais elle ne l'est pas pour les touristes étrangers.

Depuis une dizaine d'années, la ville de Paris vise à diminuer les émissions de pollution de l'air en réduisant la densité du trafic routier. Pour cela, les grands axes et les places sont réaménagés : par exemple, l'aménagement des voies sur Berges qui a débuté en mai 2012, <http://lesberges.paris.fr/>, ou le réaménagement de la place de la République comme « Place durable », <http://www.placedelarepublique.paris.fr/>). Parallèlement, l'office du tourisme et des congrès de Paris développe, sur son site internet, depuis quelques années, le « *Paris destination touristique durable* » (<http://www.parisinfo.com/tourisme-durable/>). Nous n'avons pas eu les contacts nécessaires pour savoir quel était le public visé, mais au vu de nos résultats, il serait intéressant que cette médiatisation soit mise en avant pour les touristes provinciaux. La volonté de la ville de Paris et de l'office de tourisme de proposer un Paris « plus vert » avec moins de nuisances environnementales peut changer l'image de Paris pour les

touristes français. L'espace urbain pourrait être plus apprécié et la ville pourrait être choisie comme destination dans quelques années pour sa qualité environnementale.

Sur la page de l'office du tourisme parisien, des activités vertes dans les parcs, ou avec des déplacements en vélo ou à pied sont conseillées. Au vu des résultats de nos campagnes de mesure des taux de particules, des circuits touristiques situés loin des voies de circulation pourraient être proposés. La population et les touristes pourraient aussi être informés sur ce site qu'ils sont plus exposés à l'ozone lors des journées de fortes chaleurs dans les parcs et que les personnes les plus sensibles devraient les éviter.

Perspectives de recherche :

Au vu des résultats, deux axes de recherche se dégagent en perspective :

➔ Le premier est une étude plus détaillée des variations spatiales à une échelle locale des particules fines (PM_{2,5}) et ultra-fines (particules inférieures à 1 µm, PM₁) qui n'ont pas été étudiées dans cette thèse. Nous avons vu que les particules étaient plus fines à proximité de la circulation routière : un transect partant de la circulation et en s'éloignant pourrait être réalisé sur plusieurs grands axes parisiens et sur plusieurs jours afin d'étudier plus en détail cette variation. Il permettrait de quantifier la diminution de particules fines par rapport aux particules les plus grossières selon la distance au trafic routier et les conditions atmosphériques. Des analyses chimiques pourraient compléter cette étude pour connaître l'origine des particules.

De plus, nous avons vu que le ratio entre les particules fines et les particules grossières varie selon la morphologie urbaine et la hauteur. Des analyseurs de particules et des anémomètres pourraient être placés dans des rues larges et dans des rues canyon, ainsi qu'à différentes hauteurs. Pour étudier plus en détail l'impact de la morphologie urbaine, un système d'information géographique avec le bâti et sa hauteur pourrait être utilisé.

➔ Le second axe de recherche vise à étudier plus en détail la perception de la qualité de l'air selon l'origine des touristes. Pour cela, une étude dans différentes villes internationales pourrait être réalisée auprès de la population afin de

connaître leur représentation de la qualité de l'air en étudiant les politiques locales et nationales sur la pollution de l'air, leur accès à l'information, la médiatisation des questions environnementales et leur culture. Dans un premier temps, des enquêtes pourraient être réalisées dans une ville européenne du nord et une ville européenne du sud pour comparer les différences de perceptions. Dans un second temps, d'autres villes pourraient être le lieu d'étude en Europe et hors de l'Europe. Il serait par ailleurs intéressant de développer les différences de perceptions et d'appréhensions de la qualité de l'air dans les pays occidentaux avec une vision analytique et ceux, en Afrique et en Asie, avec une vision holistique.

Bibliographie

- Adams, H. S., Nieuwenhuijsen, M. J., Colvile, R. N., McMullen, M. A. S., and Khandelwal, P., 2001. "Fine Particle (PM_{2.5}) Personal Exposure Levels in Transport Microenvironments, London, UK." *Science of The Total Environment* 279 (1-3): 29 – 44.
- ADEME. 2002. *Classification et critères d'implantations des stations de surveillance de la qualité de L'air*. Éditions ADEME. 64 p.
- ADEME. 2008. *Pollutions Olfactives*. Paris: L'USINE NOUVELLE, DUNOD : 7-12
- ADEME. 2011. *La Qualité de L'air Dans Les Agglomérations Françaises : Bilan 2010 de L'indice ATMO*. Rapport ADEME. 37 p.
- Afsset. 2009a. *Émissions de Dioxyde D'azote de Véhicules Diesel : Impact Des Technologies de Post-traitement Sur Les Émissions de Dioxyde D'azote de Véhicules Diesel Et Aspects Sanitaires Associés*. Rapport Afsset. 265 p.
- Afsset. 2009b. *Pollution Par Les Particules Dans L'air Ambiant : Synthèse Des Éléments Sanitaires En Vue D'un Appui à L'élaboration de Seuils D'information Et D'alerte Du Public Pour Les Particules Dans L'air Ambiant*. Rapport Afsset. 137 p.
- Afsset et Airparif. 2007. *La Qualité de L'air Autour Du Cou : Tendances Confirmées Par La Deuxième Campagne de Mesures*. Communiqué de presse. 3 p.
- Airparif. 2001. *Évaluation Des Franciliens à La Pollution Atmosphérique Au Cours D'une Journée*. Rapport d'activité. 254 p.
- Airparif. 2003. "Canicule Et Pollution Par L'ozone: L'été de Tous Les Records." *Airparif Actualité* 40: 1–4.
- Airparif. 2008a. *Caractérisation de L'exposition Personnelle D'un Échantillon de Franciliens*. Rapport d'activité. 101 p.
- Airparif. 2008b. *Caractérisation de L'exposition Personnelle D'un Échantillon de Salariés D'une Société Parisienne de Livraison à Vélo*. Rapport Airparif. 17 p.
- Airparif. 2008c. *Synthèse Des Connaissances Sur Les Particules En Suspension Dans L'air Et Des Travaux d'Airparif Sur Ces Polluants*. Rapport d'activité. 105 p.
- Airparif. 2009a. *Bilans Des Émissions de Polluants Atmosphériques Et de Gaz à Effet de Serre En Île-de-France (sur La Base Des Données de Référence de L'année 2005)*. Rapport d'activité. 100 p.
- Airparif. 2009b. *Exposition Des Automobilistes Franciliens à La Pollution Atmosphérique Liée Au Trafic Routier: Trajet "Domicile-travail"*. Rapport d'activité. 103 p.
- Airparif. 2009c. *Campagne de Mesure à La Station de Métro Faidherbe-Chaligny : Impact de L'extérieur Sur Les Niveaux de Pollution Intérieurs*. Rapport Airparif. 71 p.
- Airparif. 2009d. *Influence Des Aménagements de Voirie Sur L'exposition Des Cyclistes à La Pollution Atmosphérique*. Rapport d'activité. 62 p.
- Airparif. 2011a. *La Qualité de L'air Île-de-France En 2010*. Rapport Airparif. 100 p.
- Airparif. 2011b. *Origine Des Particules En Île-de-France*. Rapport d'activité. 172 p.
- Airparif. 2012a. *La Qualité de L'air En Ile de France En 2011*. Rapport Airparif. 141 p.

- Airparif. 2012b. *Bilan Des Émissions Pour La Ville de Paris*. Rapport Airparif. 16 p.
- Airparif. 2013. *La Qualité de L'air En Ile de France En 2012*. Rapport Airparif. 112 p.
- Alary, R., Sunyerand, J., Ayres, J., and Viellard, H., 1995. "La Pollution Automobile à Paris: Influence Du Trafic Et Des Conditions Météorologiques." *Science of the Total Environment* 169: 53–61.
- Almeida, S. M., Canha, N., Silva, A., Do C. Freitas, M., Pegas, P., Alves, C., Evtyugina, M. and Pio, C. A., 2011. "Children Exposure to Atmospheric Particles in Indoor of Lisbon Primary Schools." *Atmospheric Environment* 45 (40, SI): 7594–7599.
- Ambroise, D., Chiron, M., Dechenaux, J., Derbez, M., Grimaldi, F., Mosqueron, L., Rambaud, J.-M., Roussel, I., Rozec, V., and Schadkowski, C., 2005. "L'évaluation de L'exposition Personnelle : Comment Faire Et Pour Quoi Faire?" *Pollution Atmosphérique* 186: 203–227.
- Anderson, H. R., Spix, C., Medina, S., Schouten, J. P., Castellsague, J., Rossi, G., (et al.) 1997. "Air Pollution and Daily Admissions for Chronic Obstructive Pulmonary Diseases in 6 European Cities: Results from APHEA Project." *European Respiratory Journal* 10(5): 1064–1071.
- Annessi-Maesano, I. 2007. in Charles, L., Ebner, P., Roussel, I., Weill, A., *Évaluation Et Perception de L'exposition à La Pollution Atmosphérique*, La documentation Française : 87–96
- Ashmore, M. R., and Dimitroulopoulou, C., 2009. "Personal Exposure of Children to Air Pollution." *Atmospheric Environment* 43 (1): 128–141.
- Atkinson, R. W., Anderson, H. R., Ayres, J., Sunyerand, J., Baccini, M., Vonk, J.M., et al. . 2001. "Acute Effects of Particulate Air Pollution on Respiratory Admissions: Results from APHEA 2 Project. Air Pollution and Health: a European Approach." *Am J Respir Crit Care Med* 164(10): 1860–1866.
- Atkinson-Palombo, C. M., Miller, J. A., and Balling, R. C. 2006. "Quantifying the Ozone 'Weekend Effect' at Various Locations in Phoenix, Arizona." *Atmospheric Environment* 40 (39): 7644 – 7658.
- Ballesta, P. P., Field, R. A., Connolly, R., Cao, N., Baeza Caracena, A., and De Saeger, E. 2006. "Population Exposure to Benzene: One Day Cross-sections in Six European Cities." *Atmospheric Environment* 40 (18): 3355–3366.
- Bell, M. L., McDermott, A., Zeger, S. L., Samet, J. M., and Dominici, F., 2004. "Ozone and Short-term Mortality in 95 US Urban Communities, 1987-2000." *JAMA* 292(19): 2372–2378.
- Beltrando, G., 2004. *Les Climats*. Armand Collin. 261 p.
- Bickerstaff, K., and Walker, G., 2001. "Public Understandings of Air Pollution: The 'Localisation' of Environmental Risk." *Global Environmental Change* 11: 133–145.
- Boarnet, M. G., Houston, D., Edwards, R., Princevac, M., Ferguson, G., Pan, H., and Bartolome, C., 2011. "Fine Particulate Concentrations on Sidewalks in Five Southern California Cities." *Atmospheric Environment* 45 (24): 4025–4033.
- Brands, M., Kamphus, M., Boettger, T., Schneider, J., Drewnick, F., Roth, A., Curtius, J., et al. 2011. "Characterization of a Newly Developed Aircraft-Based Laser Ablation Aerosol Mass Spectrometer (ALABAMA) and First Field Deployment in Urban Pollution Plumes over Paris During MEGAPOLI 2009." *Aerosol Science and Technology* 45 (1): 46–64.
- Brauer, M., Hoek, G., Van Vliet, P., Meliefste, K., Fischer, P. H., Wijga, A., Koopman, L. P., et al. 2002. "Air Pollution from Traffic and the Development of Respiratory Infections and Asthmatic and Allergic Symptoms in Children." *A J of Respir and Crit Care Med*. 166: 1092–1098.
- Bridier, S., and Quénol, H., 2006. « Climat et mesures de la pollution en ville , une forte variabilité spatio-temporelle » in Dorier-Apprill E., Faburel G., Arnould P., Bridier S. and Quénol H., *Ville Et Environnement*. SEDES : 315–344.

- Briggs, D. J., de Hoogh, K., Morris, C., and Gulliver, J., 2008. "Effects of Travel Mode on Exposures to Particulate Air Pollution." *Environment International* 34 (1): 12 – 22.
- Brignon, J. M., 2003. "Les Effets Environnementaux Des Particules." *Pollution Atmosphérique* 177: 91–102.
- Brody, R., 2013. "Glad to Be Unhappy: The French Case", *The New Yorker Edition*, March 27.
<http://www.newyorker.com/online/blogs/movies/2013/03/glad-to-be-unhappy-the-french-case.html>, consulté le 2 avril 2013.
- Brücker, G. (dir.) et al. 2006. "Effets à Long Terme de La Pollution Atmosphérique : Études Européennes." *Extrapol* (26): 52 p.
- Buonanno, G., Fuoco, F. C., and Stabile, L., 2011. "Influential Parameters on Particle Exposure of Pedestrians in Urban Microenvironments." *Atmospheric Environment* 45 (7): 1434–1443.
- Burley, J. D. and Ray, J. D., 2007. "Surface Ozone in Yosemite National Park." *Atmospheric Environment* 41 (28): 6048–6062.
- BVA. 2003. *L'image d'Airparif Auprès Des Franciliens*. Rapport BVA. 22 p.
- Camalier, L., Cox, W., and Dolwick, P., 2007. "The Effects of Meteorology on Ozone in Urban Areas and Their Use in Assessing Ozone Trends." *Atmospheric Environment* 41 (33): 7127–7137.
- Camredon, M., and Aumont, B., 2007. "L'ozone Troposphérique: Production/consommation Et Régimes Chimiques." *Pollution Atmosphérique* 193: 51–60.
- Cantat, O., 2004. "L'îlot de Chaleur Urbain Parisien Selon Les Types de Temps." *Norois* 191: 75–102.
- Carrega, P., Martin, N., Yohia, C., 2010, « Ozone et flux d'air dans l'arrière-pays niçois : mesures et modélisation à fine échelle spatiale durant un épisode estival (le 10 août 2006) », *Pollution atmosphérique* 207 : 461-474.
- Castano, C., and Moser, G., 2007. "Informations, Perceptions de La Pollution de L'air Et Actions Préventives : Les Raisons de Discordances Multiples." *Air Pur* 73: 5–9.
- Cattaneo, A., Taronna, M., Consonni, D., Angius, S., Costamagna, P., and Cavallo, D. M., 2010. "Personal Exposure of Traffic Police Officers to Particulate Matter, Carbon Monoxide, and Benzene in the City of Milan, Italy." *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 7 (6): 342–351.
- Chapin, F. S., 1974. *Human Activity Patterns in the City. Things People Do in Time and Space*. Wiley. New York.
- Chow, J. C., Engelbrecht, J. P., Watson, J. G., Wilson, W. E., Frank, N. H., and Zhu, T. 2002. "Designing Monitoring Networks to Represent Outdoor Human Exposure." *Chemosphere* 49 (9): 961–978.
- CITEPA. 1994. *Inventaire Des Émissions de Polluants Atmosphériques CORINAIR (SO2-NOx-COVNM-CH4-CO-CO2-N2O-NH3)*. Rapport CITEPA.
- CITEPA- SECTEN. 2011. *Inventaire Des Émissions de Polluants Atmosphériques En France - Séries Sectorielles Et Analyses Étendues*. Rapport CITEPA - Format SECTEN. 328 p.
- Collet, S. 2009. "Les Émissions de Polluants Par Les Foyers Domestiques." *Pollution Atmosphérique* Numéro spéciale - mars 2009: 83–90.
- Conseil régional d'Île-de-France, 2009. *Plan Régional Pour La Qualité de l'Air*. Rapport Conseil régional d'Île-de-France. 80 p.
- Conseil Supérieur d'Hygiène Public de la santé en France-Section d'Évaluation des risques de l'environnement sur la. 1996. *L'ozone, Indicateur Majeur de La Pollution Photochimique En France: Évaluation Et Gestion Du Risque Sur La Santé*. Ministère du travail et des affaires sociales. 164 p.

- Dab, W., Medina, S., Quenel, P., Le Moullec, Y., Le Tertre, A., Thelot, B., Monteil, C., *et al.* 1996. "Short Term Respiratory Health Effects of Ambient Air Pollution: Results of the APHEA Project in Paris." *Journal of Epidemiology and Community Health* 50: 42 – 46.
- Dab, W., and Roussel, I., 2001. *L'air et la ville*, Hachette Littératures, 218 p.
- Dahech, S., 2007. *Le Vent à Sfax (Tunisie), Impacts Sur Le Climat Et La Pollution Atmosphérique*. Thèse de l'université Paris 7. 351 p.
- Dahech, S., and Beltrando, G., 2008. "Les Teneurs En CO Dans Les Bars à Chicha : Étude de Cas à Paris En Fonction de La Consommation Et de La Ventilation Des Lieux." *Pollution Atmosphérique* 200: 347–357.
- Dahech, S., Beltrando, G., and Quénot, H., 2006. "Brise de Mer Et Pollution Atmosphérique à Sfax (Tunisie)." *Pollution Atmosphérique* 190: 211–223.
- Davis, R. E., Normile, C. P., Sitka, L., Hondula, D. M., Knight, D. B., Gawtry, S. P., and Stenger, P. J. 2010. "A Comparison of Trajectory and Air Mass Approaches to Examine Ozone Variability." *Atmospheric Environment* 44 (1): 64–74.
- DeCarlo, P. F., Dunlea, E. J., Kimmel, J. R., Aiken, A. C., Sueper, D., Crounse, J., Wennberg, P. O., *et al.* 2008. "Fast Airborne Aerosol Size and Chemistry Measurements Above Mexico City and Central Mexico During the MILAGRO Campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics* 8 (14): 4027–4048.
- Derbez, M., Mosqueron, L., and Nedellec, V., 2001. *Quelles Sont Les Expositions Humaines à La Pollution Atmosphérique ?* La documentation Française. 64 p.
- Direction de la communication de Plaine Commune., 2010. *Le SCOT En Un Clin D'oeil*. Synthèse. 9 p.
- DIRIF. 2012. *Indicateurs de L'évolution Du Trafic Routier Sur Le Réseau DIRIF En 2011*. Rapport DIRIF. 18 p.
- Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris Jr, B. G., and Speizer, F. E. 1993. "An Association Between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities." *N Engl J Med* 329: 1753–1759.
- Doward, J., 2013. "Why the Miserable French Should Put the Accent on English", March 24, *The Observer*. <http://www.guardian.co.uk/world/2013/mar/24/french-taught-to-be-gloomy>. Consulté le 2 avril 2012.
- Doyle, M., and Dorling, S., 2002. "Visibility Trends in the UK 1950-1997." *Atmospheric Environment* 36 (19): 3161–3172.
- Draxler, R. R., and Hess, G. D., 2004. "Description of the HYSPLIT 4 Modeling System (NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224). Dec., 1997, Revised Jan., 2004." *NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD*. [Http://www.arl.noaa.gov/data/web/models/hysplit4/win95/Arl-224.pdf](http://www.arl.noaa.gov/data/web/models/hysplit4/win95/Arl-224.pdf).
- Dudouit Fichet, A., 2006. *Brise de Mer Et Brise de Terre Et Risque de Pollution Photochimique Dans La Région Caennaise (Basse-Normandie)*. Thèse de l'université de Caen Basse Normandie. 444 p.
- Ebner, P., Le Moullec, Y. and Weill, A. (dir). 2005. *Pollution Par Les Particules Atmosphériques; État Des Connaissances Et Perspectives de Recherche (Primequal-Predit)*. La Documentation Française, Paris. 279 p.
- Edwards, R.-D., Jurvelin, J., Saarela, K., and Jantunen, M., 2001. "VOC Concentrations Measured in Personal Samples and Residential Indoor, Outdoor and Workplace Microenvironments in EXPOLIS-Helsinki, Finland." *Atmospheric Environment* 35 (27): 4531–4543.
- Eilstein, D., 2006. "Etudes Américaines: Le Rêve Européen ?" *Extrapol* 30: 3–7.

- Endlicher W. (dir.) et al., 2011. *Perspectives in Urban Ecology: Studies of Ecosystems and Interactions Between Humans and Nature in the Metropolis of Berlin*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 15–42.
- Escourrou, G., 1991. *Le Climat Et La Ville*. Nathan Université.
- Festy, B., 2008. "Les Particules Grossières (PM 'Coarses') Participant-elles à La Nocivité Des Particules Et/ou Des Aérosol Ambiant?" *Extrapol* 34: 6–10.
- Flemming, J., Stern, R., and Yamartino, R.J., 2005. "A New Air Quality Regime Classification Scheme for O₃, NO₂, SO₂ and PM₁₀ Observations Sites." *Atmospheric Environment* 39 (33): 6121–6129.
- Fontan, J., 2004. *Les Pollutions de L'air. Les Connaîtres Pour Les Combattre*. Vuibert, Paris. 224 p.
- Fontan, J., Quisefit, J.-P., Tymen, G., Weill, A., and Masclet, P., 2005. "Les Particules: Caractérisation Pour Les Problèmes de Santé." *Pollution Atmosphérique* 188: 469–479.
- Frere, S., Roussel, I., Bonnefoy, B., Maramotti, I., and Moch, A., 2005. *Représentation Et Évaluation de La Pollution Atmosphérique Dans L'agglomération de Dunkerque*. Document APPA Nord-Pas de Calais. 7 p.
- Gandemer, J., and Guyot, A., 1981. *La Protection Contre Le Vent*. CSTB. 63 p.
- Gazeau, A., Besombes, J.-L., Cozic, J., Duval, M., Hulin, A., Jaffrezo, J.-L., Pakulic, C., Piot, C., and Racher, A., 2011. *Particul'Air : Etude Inter-régionale de La Pollution Particulaire En Zone Rurale*. Rapport ADEME. 168 p.
- George, P., 1971. *L'environnement*. P.U.F. « Que Sais-je ? » n° 1450. Paris. 128 p.
- Gherzi, V., Rosso, A., Moukhtar, S., Léger, K., Sciare, J., Bressi, M., Nicolas, J., Feron, A., and Bonnaire, N., 2012. "Origine Des Particules Fines (PM_{2.5}).", *Pollution Atmosphérique* 189 : 188 – 198.
- Glandus, L.M., Dahech, S., and Beltrando G., 2011. "Variabilité Spatio-temporelle Du CO Dans Le Centre de Limoges : Apport Des Mesures Itinérantes." *Pollution Atmosphérique* 210 : 217-224.
- Glatron, S. 2009. *Représentations Cognitives Et Spatiales Des Risques Et Des Nuisances Pour Les Citadins - Texte de Synthèse*. Mémoire HDR. 200 p.
- Gonzalez-Flesca, N., Bates, M.S., Delmas, V., and Cocheo, V., 2000. "Benzene Exposure Assessment at Indoor, Outdoor and Personal Levels. The French Contribution to the Life MACBETH Programme." *Environmental Monitoring and Assessement* 65 (1-2): 59–67.
- Goodman, P., Agnew, M., McCaffrey, M., Paul, G., and Clancy, L., 2007. "Effects of the Irish Smoking Ban on Respiratory Health of Bar Workers and Air Quality in Dublin Pubs." *AMERICAN JOURNAL OF RESPIRATORY AND CRITICAL CARE MEDICINE* 175 (8): 840–845.
- Gramsch, E., Cereceda-Balic F., Oyola P., and Von Baer D., 2006. "Examination of Pollution Trends in Santiago de Chile with Cluster Analysis of PM₁₀ and Ozone Data." *Atmospheric Environment* 40 (28): 5464–5475.
- Grange, D., Sommen, C., and Gremy, I., 2010. *Les Perceptions de La Pollution de L'air Extérieur En Île-de-France*. Rapport ORS. 178 p.
- Gros, V., Sciare, J., and Yu, T., 2007. "Air-quality Measurements in Megacities: Focus on Gaseous Organic and Particulate Pollutants and Comparison Between Two Contrasted Cities, Paris and Beijing." *Comptes Rendus Geosciences* 339 (11-12): 764–774.
- Guégan, H., Leminh, Q., Chaveny, M., Patouille, B., and Bourquin, P., 2008. "Identification Et Quantification Des Contributions Relatives Des Sources de Poussières Fines En Milieu Urbain." *Pollution Atmosphérique* 198-199: 197–204.

- Gulliver, J., and Briggs, D. J., 2005. "Time-space Modeling of Journey-time Exposure to Traffic-related Air Pollution Using GIS." *Environmental Research* 97 (1): 10 – 25.
- Gulliver, J., and Briggs, D. J., 2007. "Journey-time Exposure to Particulate Air Pollution." *Atmospheric Environment* 41 (34): 7195–7207.
- Harpet, C., 2010. "Risques Sanitaires Et Perception Sociale: Entre Analyse Experte Et Vécu Du Public Exposé." *Pollution Atmosphérique* Numéro spécial - novembre 2010: 101–107.
- Harrison, R. M., and Yin, J., 2000. "Particulate Matter in the Atmosphere: Which Particle Properties Are Important for Its Effects on Health?" *Science of The Total Environment* 249 (1-3): 85–101.
- Healy, R. M., Sciare, J., Poulain, L., Kamili, K., Merkel, M., Mueller, T., Wiedensohler, A. *et al.* 2012. "Sources and Mixing State of Size-resolved Elemental Carbon Particles in a European Megacity: Paris." *Atmospheric Chemistry and Physics* 12 (4): 1681–1700.
- Host, S., Chatignoux, E., and Gremy, I., 2008. *Évaluation Des Risques de La Pollution Urbaine Sur La Santé : Analyse Des Liens à Court Terme Entre Niveaux de Pollution Particulaire Et Morbidité (2003-2006)*. Rapport d'étude- Observatoire régional de santé d'Ile-de-France. Paris. 63 p.
- Houzé, M.-L. 2006. *Prévision Et Spatialisation Des Concentrations En Ozone Troposphérique En Bourgogne*. Thèse de l'Université de Bourgogne. 334 p.
- Hyslop, N. P., 2009. "Impaired Visibility: The Air Pollution People See." *Atmospheric Environment* 43 (1): 182–195.
- Ifen. 2003. *Les Français Et L'environnement : Opinions Et Attitudes Au Début 2002*. Rapport Ifen. 95 p.
- InVS. 2008. *Évaluation de L'impact Sanitaire de La Pollution Atmosphérique Urbaine - Concepts Et Méthodes*. Rapport d'étude InVS. 38 p.
- IRSN. 2011. *Baromètre IRSN 2011 Sur La Perception Des Risques Et de La Sécurité*. Rapport IRSN. 196 p.
- Ipsos. 2008. *L'image d'Airparif Et de La Qualité de L'air Auprès Des Franciliens*. Rapport Ipsos. 31 p.
- Itano, Y., Bandow, H., Takenaka, N., Saitoh, Y., Asayama, A., and Fukuyama, J., 2007. "Impact of NOx Reduction on Long-term Ozone Trends in an Urban Atmosphere." *Science of the Total Environment* 379 (1): 46–55.
- Jacquemin, B., Sunyer, J., Forsberg, B., Götschi, T., Bayer-Oglesby, L., Ackermann-Liebrich, U., De Marco, R., *et al.*, 2007. "Annoyance Due to Air Pollution in Europe." *International Journal of Epidemiology* 36 (4): 809–820.
- Janssen, S., Dumont, G., Fierens, F., Deutsch, F., Maiheu, B., Celis, D., Trimpeneers, E. and Mensink, C., 2012. "Land Use to Characterize Spatial Representativeness of Air Quality Monitoring Stations and Its Relevance for Model Validation." *Atmospheric Environment* 59: 492–500.
- Jeannée, N., Mosqueron, L., Nedellec, V., Elichegaray, G., Bouallala, S., Desqueyroux, H., Guillaume, B., Lioussé, C., and Lagache, R., 2006. "Évaluation de L'exposition En Zones Urbaines à La Pollution Atmosphérique : Méthodes Existantes Et Application Aux PM10 En France Métropolitaine." *Pollution Atmosphérique* 190: 185–195.
- Johansson, C., Norman, M., and Gidhagen, L., 2007. "Spatial & Temporal Variations of PM10 and Particle Number Concentrations in Urban Air." *Environment Monitoring and Assessment* 127: 477–487.
- Jolliffe, I. T., 2002. *Principal Component Analysis*. New York: Springer-Verlag. 487 p.
- Joly, M., and Peuch, V.-H. 2012. "Objective Classification of Air Quality Monitoring Sites over Europe." *Atmospheric Environment* 47: 111–123.
- Kampa, M., and Castanas, E., 2008. "Human Health Effects of Air Pollution." *Environmental Pollution* 151 (2): 362–367.

- Katsouyanni, K., Schwartz, J., Spix, C., Touloumi, G., Zmirou, D., Zanobetti, A., Wojtyniak, B., *et al.* 1996. "Short Term Effects of Air Pollution on Health: a European Approach Using Epidemiologic Time Series Data: The APHEA Protocol." *J Epidemiol Community Health* 50: 12–18.
- Katsouyanni, K., Touloumi, G., Spix, C., Schwartz, J., Balducci, F., Medina, S., Rossi, G., *et al.* 1997. "Short Term Effects of Ambient Sulphur Dioxide and Particulate Matter on Mortality in 12 European Cities: Results from Time Series Data from the APHEA Project." *British Medical Journal* 14: 1658–1663.
- Kaur, S., Clark, R. D. R., Walsh, P. T., Arnold, S. J., Colville, R. N., and Nieuwenhuijsen, M. J., 2006. "Exposure Visualisation of Ultrafine Particle Counts in a Transport Microenvironment." *Atmospheric Environment* 40 (2): 386 – 398.
- Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M. J., and Colville, R. N., 2007. "Fine Particulate Matter and Carbon Monoxide Exposure Concentrations in Urban Street Transport Microenvironments." *Atmospheric Environment* 41 (23): 4781 – 4810.
- Kaur, S., and Nieuwenhuijsen, M. J., 2009. "Determinants of Personal Exposure to PM_{2.5}, Ultrafine Particle Counts, and CO in a Transport Microenvironment." *Environmental Science and Technology* 43 (13): 4737–4743.
- Kim, K. Y., Kim, Y. S., Roh, Y. M., Lee, C. M., and Kim, C. N., 2008. "Spatial Distribution of Particulate Matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul Metropolitan Subway Stations." *Journal of Hazardous Materials* 154 (1-3): 440–443.
- Kleinman, L. I., Daum, P.H., Lee, J.H., Lee, L.J., Nunnermacker, Y., Springston, S.R., Newman, L., Weinstein Lloyd, J., and Sillman, S., 1997. "Dependence of Ozone Production on NO and Hydrocarbons in the Troposphere." *Geophys. Res. Lett.* 24(18): 2299–2302.
- Kleinman, L.I. 2005. "The Dependence of Tropospheric Ozone Production Rate on Ozone Precursors." *Atmospheric Environment* 39: 575–586.
- Kot-Wasik, A., Zabiegała, B., Urbanowicz, M., Dominiak, E., Wasik, A., and Namiesnik, J. 2007. "Advances in Passive Sampling in Environmental Studies." *Analytica Chimica Acta* 602 (2): 141–163.
- Kuenzli, N., 2006. "Une Longue Route Pour Comprendre Les Effets à Long Terme de La Pollution Atmosphérique." *Extrapol* 29: 5–8.
- La voix du Nord. 2012. "Pollution Aux Particules Fines : Le Seuil D'alerte Est Dépassé Dans Le Nord - Pas-de-Calais", 2 octobre, *La voix du Nord*. <http://www.lavoixdunord.fr/region/pollution-aux-particules-fines-le-seuil-d-alerte-est-depasse-dans-le-nord-pas-de-calais-ia0b0n235867>. Consulté le 22 novembre 2012.
- Lameloise, P., 2007. « Quelle surveillance pour quel public ? » in Charles L., Ebner P., Roussel I., Weill A., *Évaluation Et Perception de L'exposition à La Pollution Atmosphérique*. La documentation Française : 21–28
- Lammel, A. 2007. « La perception de la pollution atmosphérique selon les systèmes de pensée », in Charles L., Ebner P., Roussel I., Weill A., *Évaluation Et Perception de L'exposition à La Pollution Atmosphérique*. La documentation Française : 71–84.
- Langner, M., Draheim, T., and Endlicher, W., 2011a. "Particulate Matter in the Urban Atmosphere: Concentration, Distribution, Reduction – Results of Studies in the Berlin Metropolitan Area." In Endlicher, W., (dir.) *et al.*, *Perspectives in Urban Ecology*, Springer Berlin Heidelberg :15–41.
- Langner, M., Kull, M., and Endlicher W., 2011b. "Determination of PM₁₀ Deposition Based on Antimony Flux to Selected Urban Surfaces." *Environmental Pollution* 159 (8-9): 2028 – 2034.
- Larssen, S., Sluyter, R., and Helmis, C., 1999. *Criteria for EUROAIRNET : The EEA Air Quality Monitoring and Information Network*. Rapport European Environment Agency. 56 p.

- Lau, J., Hung, W. T., and Cheung, C. S., 2009. "Interpretation of Air Quality in Relation to Monitoring Station's Surroundings." *Atmospheric Environment* 43 (4): 769–777.
- Le Parisien. 2012. "Pourquoi Une Pollution Aux Particules", 2 novembre, *Le Parisien*.
<http://www.leparisien.fr/espace-premium/air-du-temps/pourquoi-une-pollution-aux-particules-11-02-2012-1855893.php>. Consulté le 22 novembre 2012.
- Lenschow, P., Abraham, H.-J., Kutzner, K., Lutz, M., Preuss, J.-D. and Reichenbacher, W., 2001. "Some Ideas About the Sources of PM10." *Atmospheric Environment* 35 (1): 23–33.
- Le Tertre, A., Quénel, P., Eilstein, D., Medina, S., Prouvost, H., and Pascal, L., *et al.* 2002. "Short-term Effects of Air Pollution on Mortality in Nine French Cities: a Quantitative Summary." *Arch Environ Health* 57(4): 311–319.
- MacKerron, G., and Mourato, S., 2009. "Life Satisfaction and Air Quality in London." *Ecological Economics* 68 (5): 1441–1453.
- Marano, F., 2007. "A-t-on Raison de Considérer Que Les Particules Atmosphériques Fines Et Ultrafines Sont Dangereuses Pour La Santé ?" *Extrapol* 33: 4–7.
- Marano, F., 2012. "Mécanismes D'action Des Particules Atmosphériques Fines Et Ultrafines." *Pollution Atmosphérique* (N° spécial particules): 20–24.
- Marquez, C., Castro, T., Muhlia, A., Moya, M., Martinez-Arroyo, A., and Baez, A., 2005. "Measurement of Aerosol Particles, Gases and Flux Radiation in the Pico de Orizaba National Park, and Its Relationship to Air Pollution Transport." *Atmospheric Environment* 39 (21): 3877–3890.
- Martin, N., 2008. *La Pollution Par L'ozone Et La Climatologie Dans Un Espace Méditerranéen: Les Alpes-Maritimes*. Thèse de l'université de Nice Sophia Antipolis. 290 p.
- Martin, N., Carrega, P., 2009 : « La variabilité spatiale de l'ozone en milieu urbain et périurbain : le cas de Nice ». *Pollution atmosphérique* 204 : 297-313.
- McNabola, A., Broderick, B.M., and Gill, L.W., 2008. "Relative Exposure to Fine Particulate Matter and VOCs Between Transport Microenvironments in Dublin: Personal Exposure and Uptake." *Atmospheric Environment* 42 (26): 6496–6512.
- Medina, S., Le Tertre, A., Quénel, P., and Le Moullec, Y., 1994. *Impact de La Pollution Atmosphérique Sur La Santé En Île-de-France : Résultats 1987-1992. Évaluation Des Risques de La Pollution Urbaine Sur La Santé*. Rapport d'étude - Observatoire régional de santé d'Île-de-France. 104 p.
- Menard, C., Girard, D., Léon, C., and Beck, F. (dir), 2008. *Baromètre Santé Environnement 2007*. Saint-Denis: INPES, coll. Baromètre santé. 420 p.
- Menut, L., Vautard, R., Flamant, C., Abonnel, C., Beekman, M., Chazette, P. and *et al.*, 2000. "Measurements and Modelling of Atmospheric Pollution over the Paris Area: An Overview of the ESQUIF Project." *Annales Geophysicae* 18: 1467–1481.
- Ministère de l'Ecologie et du Développement et de l'Aménagement Durable (MEDAD). 2007. *Circulaire Relative à L'information Du Public Sur Les Particules En Suspension Dans L'air Ambiant*. Circulaire du ministère. 12 p.
- Molnár, P., Janhäll, S., and Hallquist, M., 2002. "Roadside Measurements of Fine and Ultrafine Particles at a Major Road North of Gothenburg." *Atmospheric Environment* 36 (25): 4115 – 4123.
- Moser, G., 2007. « Pollution atmosphérique et atteinte à la qualité de la vie » in Charles L., Ebner P., Roussel I., Weill A., *Évaluation Et Perception de L'exposition à La Pollution Atmosphérique*. La documentation Française : 97–106.

- Mosqueron, L., and Nedellec, V., 2004. *Inventaires Des Données Françaises Sur La Qualité de L'air Intérieur Des Batiments : Actualisation Des Données Sur La Période 2001-2004*. Rapport de l'Observatoire de la Qualité de l'Air intérieur. 61 p.
- Nguyen, H. T., and Kim, K.-H., 2006. "Comparison of Spatiotemporal Distribution Patterns of NO₂ Between Four Different Types of Air Quality Monitoring Stations." *Chemosphere* 65: 201–212.
- Nikolopoulou, M., Kleissl, J., Linden, P. F., and Lykoudis, S., 2011. "Pedestrian's Perception of Environmental Stimuli Through Field Surveys: Focus on Particulate Pollution." *Science of The Total Environment*, 409 (13) : 2493–2502
- Observatoire des déplacements à Paris, 2009. *Le Bilan Des Déplacements En 2008 à Paris*. Rapport d'activité.
- Observatoire des déplacements à Paris. 2012a. *Le Bilan Des Déplacements En 2011 à Paris*. Rapport d'activité.
- Observatoire économique du tourisme parisien, 2010. *Le Tourisme à Paris - Chiffre Clés 2009*. Rapport. 36 p.
- Observatoire économique du tourisme parisien. 2011. *Le Tourisme à Paris - Chiffre Clés 2010*. Rapport d'activité : 36 p.
- Observatoire économique du tourisme parisien. 2012. *Le Tourisme à Paris - Chiffre Clés 2011*. Rapport. 38 p.
- Oke, T.R. 1987 (2nd ed.). *Boundary Layer Climate*. Routledge : 435 p.
- OMS. 1987. *Air Quality Guidelines for Europe*. World Health Organization Regional Office for Europe. 426 p.
- OMS. 2000. *Air Quality Guidelines, 2nd Edition*. World Health Organization Regional Office for Europe. 288 p.
- OMS. 2001 (2nd ed.). *Qualité de L'air : Recommandations Pour l'Europe*. 273. OMS, Publications régionales, Série européenne, n° 91. 7 p.
- OMS. 2005. *Air Quality Guidelines, Global Update 2005*. World Health Organization Regional Office for Europe. 496 p.
- OMS. 2012. *Les Gaz D'échappement Des Moteurs Diesl Cancerogènes*. Communiqué de presse OMS. 5 P.
- Ott, W. R., 1984. "Exposure Estimates Based on Computer Generated Activity Patterns." *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 21: 97–128.
- Ouest France. 2012. "Pollution. Qualité de L'air Dégradée, Demain Mardi, Dans Le Calvados", 2 juin, *Ouest France*. http://www.ouest-france.fr/actu/actuLocale_-Pollution.-Qualite-de-l-air-degradee-demain-mardi-dans-le-Calvados_40780-2041404-----14118-aud_actu.Htm. Consulté le 14 avril 2013
- Palancar, G. Lefer, B. L., Hall, S. R., Shaw, W. J., Corr, C. A., Herndon, S. C., Slusser, J. R., and Madronich, S., 2013. "Effect of Aerosols and NO₂ Concentration on Ultraviolet Actinic Flux Near Mexico City During MILAGRO: Measurements and Model Calculations." *Atmospheric Chemistry and Physics* 13 (2): 1011–1022.
- Patriarca, E., 2012. "Qualité de L'air : Cinq Ans Après, La France Zapa", 18 juillet, *Libération*. http://www.liberation.fr/terre/2012/07/18/qualite-de-l-air-cinq-ans-apres-la-france-zapa_834192. Consulté le 2 avril 2013.
- Pédelaborde, P., 1991 (3^{ème} ed.). *Introduction Scientifique Du Climat*. SEDES. 183-244

- Pernelet-Joly, V., 2008. "La Composition Chimique Des Particules: Quels Composants Participent à La Nocivité Des Particules?" *Extrapol* 35: 6–9.
- Pires, J. C. M., Sousa, S. I. V., Pereira, M. C., Alvim-Ferraz, M. C. M., and Martins, F. G., 2008a. "Management of Air Quality Monitoring Using Principal Component and Cluster Analysis Part I: SO₂ and PM₁₀." *Atmospheric Environment* 42 (6): 1249–1260.
- Pires, J. C. M., Sousa, S. I. V., Pereira, M. C., Alvim-Ferraz, M. C. M., and Martins, F. G., 2008b. "Management of Air Quality Monitoring Using Principal Component and Cluster Analysis - Part II : CO, NO₂ and O₃." *Atmospheric Environment* 42 (6): 1261–1274.
- Pont, V., and Fontan, J., 2001. "Comparison Between Weekend and Weekday Ozone Concentration in Large Cities in France." *Atmospheric Environment* 35: 1527–1535.
- Pope, C. A., Thun, M. J., Namboodiri, M. M., Dockery, D. W., Evans, J. S., Speizer, F. E., and Heath Jr., C. W., 1995. "Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults." *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 151(3): 669–674.
- Programme de surveillance air et santé (PSAS). 2008. *Analyse Des Liens à Court Terme Entre Pollution Atmosphérique Urbaine Et Mortalité Dans Neuf Villes Françaises*. Paris: Rapport d'étude - InVS.
- Putaud, J. P., Raes, F., Van Dingenen, R., Brüggemann, E., Facchini, M. C., Decesari, S., Fuzzi, S., *et al.* 2004. "A European Aerosol Phenomenology - 2: Chemical Characteristics of Particulate Matter at Kerbside, Urban, Rural and Background Sites in Europe." *Atmospheric Environment* 38 (16): 2579–2595.
- Qin, Y., Tonnesen, G. S., and Wang, Z. 2004. "Weekend/weekday differences of Ozone, NO_x, CO, VOCs, PM₁₀ and the Light Scatter During Ozone Season in Southern California." *Atmospheric Environment* 38: 3069–3087.
- Quénol, H., Bridier, S., Frangi, J.-P., Beltrando, G., and De Rosny, G., 2006. "Space-time Variability Factors from Air Pollution Inside Paris by CO Measurement." *Erdkunde* 60: 40–55.
- Ringuet, J., Leoz-Garziandia, E., Budzinski, H., Villenave, E., and Albinet, A., 2012. "Particle Size Distribution of Nitrated and Oxygenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (NPAHs and OPAHs) on Traffic and Suburban Sites of a European Megacity: Paris (France)." *Atmospheric Chemistry and Physics* 12 (18): 8877–8887.
- Roussel, I., 2006. "Climatologie Géographique Et Pollutions Atmosphériques: Quelles Synergies?" *Actes de Colloques Journées de Climatologie – Nice, 23-25 Mars 2006* Climat et société : l'apport des géographes-climatologues: 10.
- Roussel, I., Derbez, M., Rozec, V. and Festy, B., 2003. *Contribution à Une Meilleure Connaissance de L'évolution Régionale Et Temporelle Des Déterminants de L'exposition Individuelle*. Convention ADEME n° 0162025. 187 p.
- Roussel, I., and Charles, L., 2006. "Pollution Atmosphérique Et Proximité." *Pollution Atmosphérique* 190: 175–182.
- Roussel, I. 2007. « La pollution atmosphérique, une interrogation sociétale » in Charles L., Ebner P., Roussel I., Weill A., *Évaluation Et Perception de L'exposition à La Pollution Atmosphérique*. La documentation Française : 29–53
- Roussel, I., Charles, L., and Rambaud, J.-M., 2010. "L'évaluation Et La Perception de L'exposition à La Pollution Atmosphérique : Une Interrogation Sociétale - Analyse Critique Des Résultats Du Programme PRIMEQUAL." *Pollution Atmosphérique* 205: 67–79.
- Rousset, J., 2011. "La CUB Étudie La Possibilité de Créer Des Zones D'action Prioritaires Pour L'air (Zapa), Des Secteurs Interdits Aux « Véhicules Polluants » : 4x4, Vieux Diesels; Haro Sur Les

- Véhicules Polluants", 29 janvier 2011, Sud Ouest edition.
<http://www.sudouest.fr/2011/01/29/haro-sur-les-vehicules-polluants-303880-736.php>.
 Consulté le 2 avril 2013.
- Royer, P., Chazette, P., Sartelet, K., Zhang, Q. J., Beekmann, M., and Raut, J.-C. 2011. "Comparison of Lidar-derived PM10 with Regional Modeling and Ground-based Observations in the Frame of MEGAPOLI Experiment." *Atmos. Chem. Phys.*, 11: 10705–10726.
- Samet, J. M., Dominici, F., Curriero, F.C, Coursa, I. and Zeger, S. F. 2000. "Fine Particulate Air Pollution and Mortality in 20 US Cities, 1987-1994." *New England Journal of Medicine* 343: 1742–1749.
- Samoli, E., Aga, E., Touloumi, G., Nisiotis, K., Forsberg, B. Lefranc, A. *et al.*, 2006. "Short-term Effects of Nitrogen Dioxide on Mortality: An Analysis Within the APHEA Project." *Eur Respir J* 27(6): 1129–1138.
- Shan, W., Yin, Y., Lu, H., and Liang, S., 2009. "A Meteorological Analysis of Ozone Episodes Using HYSPLIT Model and Surface Data." *Atmospheric Research* 93 (4): 767–776.
- Sillman, S. 1999. "The Relation Between Ozone, NO_x and Hydrocarbons in Urban and Polluted Rural Environments." *Atmospheric Environment* 33 (12): 1821–1846.
- Soulhac, L., Garbero, V., Salizzoni, P., Mejean, P., and Perkins, R. J., 2009. "Flow and Dispersion in Street Intersections." *Atmospheric Environment* 43 (18): 2981–2996.
- Stanley, T., 2013. "Why the Miserable French Should Put the Accent on English", March 26, *The Telegraph*. <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/europe/france/9954894/Why-the-miserable-French-should-put-the-accent-on-English.html>. Consulté le 2 avril 2013.
- Stieb, D. M., Judek, S., and Burnett, R. T., 2002. "Meta-analysis of Time-series of Air Pollution and Mortality : Effects of Gases and Particles and the Influence of Cause of Death, Age and Season." *J Air Waste Manag Assoc* 52: 470–484.
- Stone, E. A., Snyder, D. C., Sheesley, R. J., Sullivan, A. P., Weber, R. J., and Schauer, J. J., 2008. "Source Apportionment of Fine Organic Aerosol in Mexico City During the MILAGRO Experiment 2006." *Atmospheric Chemistry and Physics* 8 (5): 1249–1259.
- Stull, R. B. 1988. *A Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers (Reidel). 666 p.
- Suess, M. J., and Craxford, S. R. in "Manual on Urban Quality Management." WHO Regional Publications : 127 – 152.
- Szalai, A. 1972. *The Use of Time: Daily Activities of Urban and Suburban Populations in Twelve Countries*. Edited by The Hague Mouton.
- Touloumi, G., Katsuyanni, K., Zmirou, D., Schwartz, J., Spix, C., Ponce, A., de Leon, A., Tobias *et al.* 1997. "Short Term of Ambient Oxidant Exposure on Mortaliy : a Combined Analysis Within the APHEA Project." *American Journal of Epidemiology* 146: 177–185.
- Toupance, G. 1988. "L'ozone Dans La Basse Atmosphère. Théorie Et Pratique." *Pollution Atmosphérique* 117: 32–42.
- Umweltministerium Baden-Württemberg, 1995. *Ozonversuch Neckarsulm/Heilbronn*. Stuttgart Dokumentation über die Vorbereitung und Durchführung des Versuchs. 112 p.
- Ustache, A., and Favez, O. 2009. *Suivi Et Optimisation de L'utilisation Des TEOM-FDMS, Partie 2/2: Accompagnement à La Mise En Œuvre Des Modules FDMS*. Rapport Ineris. 47 p.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., and Gonzalez-Flesca, N. 2003. "Modelling Air Quality in Street Canyons: a Review." *Atmospheric Environment* 37 (2): 155–182.

- Vardoulakis, S., Gonzalez-Flesca, N., and Fisher, B. E. A. 2002. "Assessment of Traffic-related Air Pollution in Two Street Canyons in Paris: Implications for Exposure Studies." *Atmospheric Environment* 36 (6): 1025–1039.
- Vardoulakis, S., Gonzalez-Flesca, N., Fisher, B. E. A., and Pericleous, K. 2005. "Spatial Variability of Air Pollution in the Vicinity of a Permanent Monitoring Station in Central Paris." *Atmospheric Environment* 39 (15): 2725–2736.
- Vienneau, D., de Hoogh, K., and Briggs, D., 2009. "A GIS-based Method for Modelling Air Pollution Exposures Across Europe." *Science of The Total Environment* 408 (2): 255 – 266.
- Vukovich, F. M., and Sherwell, J., 2003. "An Examination of the Relationship Between Certain Meteorological Parameters and Surface Ozone Variations in the Baltimore-Washington Corridor." *Atmospheric Environment* 37 (7): 971–981.
- Waldvogel, C., Glatron, S., and Blanc, N., 2008. "L'indice ATMO de qualité de l'air : usage de l'instrument par les citoyens et contradictions avec leurs représentations de la pollution de l'air." In *Actes, Lille - Villeneuve d'Asq, France*.
- Wang, H., Colville, R. N., Pain, C., Aristodemou, E. and ApSimon, H. M.. 2011. "Understanding Peak Pedestrian Exposures Due to Traffic Emissions Within the Urban Environment." *Trans. Research ? Par. D- Trans. and Env.* 16 (5): 392–401.
- Weber, F. (dir.), et al. 2007. *Pollution Atmosphérique : Particules Ultrafines Et Santé*. Extrapol. 32 p.
- Weber, K., Eliasson J., Vogel, A., Fischer, C., Pohl, T., van Haren, G., Meier, M., Grobéty, B., and Dahmann, D., . 2012. "Airborne In-situ Investigations of the Eyjafjallajökull Volcanic Ash Plume on Iceland and over North-western Germany with Light Aircrafts and Optical Particle Counters." *Atmospheric Environment* 48 : 9–21
- Weber, S., Kuttler, W., and Weber K., 2006. "Flow Characteristics and Particle Mass and Number Concentration Variability Within a Busy Urban Street Canyon." *Atmospheric Environment* 40 (39): 7565 – 7578.
- Weill, A., 2007, in Charles L., Ebner P., Roussel I., Weill A., *Évaluation Et Perception de L'exposition à La Pollution Atmosphérique*. La documentation Française : 13–18.
- Yang, L.-X., Wang, D.-C., Cheng, S.-H., Wang, Z., Zhou, Y., Zhou, X.-H., and. Wang, W.-X. 2007. "Influence of Meteorological Conditions and Particulate Matter on Visual Range Impairment in Jinan, China." *Science of the Total Environment* 383: 164–173.
- Yassin, M. F., Kellnerova, R., and Janour, Z., 2008. "Impact of Street Intersections on Air Quality in an Urban Environment." *Atmospheric Environment* 42 (20): 4948–4963.

Table des figures

Introduction générale :

Figure A : Les échelles spatiales de la pollution de l'air, *adaptée d'après www.atmo-alsace.net*..... 2

Figure B : Photographie prise sur le parvis du Sacré-Cœur le 25 juillet 2012 à 15h lors d'un épisode de pollution à l'ozone (taux horaire d'ozone mesuré à la station Paris 18^{ème} de Airparif à 15h = 163 µg/m³)..... 3

Partie I : Mesures et variabilités de l'exposition et de la perception de la pollution de l'air extérieur

Figure I.1 : Pourcentage des sources d'émission de NO_x en Île-de-France pour l'année 2005 et révisé en 2008 ; *source : Airparif, 2009a* 11

Figure I.2 : Pourcentage des sources d'émission de PM₁₀ (A) et PM_{2,5} (B) en Île-de-France pour l'année 2005 et révisé en 2008 ; *source : Airparif, 2009a* 15

Figure I.3 : Évolution des polluants de leurs sources à leur concentration dans l'atmosphère ; *d'après Oke, 1987* 20

Figure I.4 : Représentation schématique des émissions et des concentrations de NO_x, PM et O₃ à l'échelle régionale ; *adapté d'après Airparif et Umweltministerium Baden-Württemberg, 1995*..... 22

Figure I.5 : Schématisation de l'évolution journalière de couche limite atmosphérique sur un sol plat, *adaptée d'après Stull, 1988 ; Toupance, 1998* 24

Figure I.6 : Variation de la couche limite urbaine entre le jour (A) et la nuit avec une inversion thermique (B) 25

Figure II.1 : Représentation schématique des étapes à considérer pour évaluer le risque sanitaire personnel dû aux polluants atmosphériques ; *adaptée d'après Derbez et al., 2001 et Airparif, 2008a* 28

Figure III.1 : Photographies prises des marches du Sacré-Cœur (A, B et C) et du parc de Belleville (D et E) avec une vue sur Paris..... 41

Figure III.2 : Photographies prises par une webcam à Seattle pour visualiser la qualité de l'air avec la distance de la visibilité, les niveaux de PM_{2,5} sur 24h et l'indice de qualité de l'air AQI ; *source : <http://www.pscleanair.org/airq/visibility/default.aspx>* 42

Figure III.3 : Panneaux d'information de la mairie de Paris avec les informations sur les mesures à prendre lors d'épisodes de pollution, photographies prises le 25 juillet 2012 lors d'un épisode de pollution à l'ozone..... 43

Figure III.4 : Nombre de documents par année et par mot clés de recherche ; *source : <https://globalfactiva.com>*..... 46

Figure III.5 : Bulletins de qualité de l'air en Alsace publié dans les *DNA* et à Zurich publié dans le *Tagesanzeiger*..... 48

Figure III.6 : Photographies sur la pollution de l'air à Pékin le 13 janvier 2013 sur le site de la BBC News, *source : <http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-21005228>*..... 49

Partie II : Variabilité spatiale et temporelle de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules en région parisienne

Figure IV.1 : Situation et photographies des stations trafic appartenant au réseau Airparif	59
Figure IV.2 : Localisation de deux stations urbaines, deux stations périurbaines et deux stations rurales <i>sources : Airparif, Géoportail</i>	60
Figure IV.3 : Localisation des stations de fond (urbaine, périurbaine, rurale) appartenant au réseau Airparif, des stations Météo France et des radiosondages, utilisés dans cette thèse ; <i>sources : Airparif, Géoportail</i>	61
Figure IV.4 : Exemple de rétrotrajectoire du 2 juillet 2009 à 14h UTC, d'une durée de 72h ; <i>source : http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php</i>	65
Figure IV.5 : Exemple d'une boîte de dispersion avec les concentrations journalières des taux de NO ₂ à la station PERI du 1 ^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2012 ; <i>source des données : Airparif</i>	66
Figure V.1 : Relief de l'Île-de-France à partir du SRTM 90 m ; <i>source : CGIAR International Research Centers</i>	70
Figure V.2 : Fréquence des directions du vent moyen maximal selon les moyennes des vitesses du vent à 10 m et par saison du 1 ^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2012 à la station Paris Montsouris, <i>source des données : Météo France</i>	71
Figure V.3 : Évolution du trafic routier de 1999 à 2012 à partir de l'indice base 100 (de 1999) ; <i>source : DIRIF, 2012</i>	72
Figure V.4 : Évolution de la part de véhicule diesel dans le parc automobile français de 1985 à 2011 ; <i>source des données : http://www.ccfa.fr/</i>	72
Figure V.5 : Émission de particules par les cheminées en région parisienne ; photographie prise le 10 décembre 2011 à 9h30 à Maisons-Alfort	73
Figure V.6 : Variation des taux moyens annuels d'O ₃ , de NO ₂ du 1 ^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2012 et des taux de PM ₁₀ et PM _{2,5} du 1 ^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012 ; <i>source des données : Airparif</i>	75
Figure V.7 : Coordonnées de chaque jour du 1 ^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2012 sur l'axe 1 des ACP réalisées sur les taux journaliers moyens d'O ₃ , NO ₂ et PM ₁₀ ; <i>source des données : Airparif</i>	79
Figure V.8 : Localisation de la station trafic de l'autoroute A1 à Saint-Denis ; <i>fond de carte : Geoportail, 2011</i>	80
Figure V.9 : Coordonnées des 28 stations de fond et direction du vent moyen à Paris Montsouris les jours avec les coordonnées les plus élevées et les plus faibles sur les axes 2 et 3 ; <i>source des données : Airparif, Météo France</i>	81
Figure V.10 : Pourcentage des jours de la semaine pour les 5% des coordonnées les plus faibles et les 5% des coordonnées les plus élevées sur l'axe 1 des ACP réalisées sur les taux journaliers moyens d'O ₃ , NO ₂ et PM ₁₀ ; <i>source des données : Airparif</i>	82
Figure V.11 : Direction et vitesse du vent à Paris Montsouris pour les 5% des coordonnées les plus faibles et les 5% des coordonnées les plus élevées sur l'axe 1 ; <i>source des données : Météo France</i>	86
Figure V.12 : Évolution hebdomadaire et journalière des concentrations d'ozone, de dioxyde d'azote de 2000 à 2012 et des taux de particules de 2007 à 2012 ; <i>source des données : Airparif</i>	88
Figure V.13 : Évolution de la circulation automobile au cours d'une journée ouvrable sur le réseau instrumenté en 2008 ; <i>source : Observatoire des déplacements à Paris, 2009</i>	89

Figure V.14 : Dispersion des concentrations journalières de NO ₂ et de PM10 les jours ouvrables durant les heures de pointe et les heures creuses pour les stations trafic et de fond du réseau Airparif de 2000 à 2012 pour les NO ₂ et de 2007 à 2012 pour les PM10 ; <i>source des données : Airparif</i>	90
Figure V.15 : Dispersion des concentrations journalières d'O ₃ durant la journée et la nuit pour les stations de fond du réseau Airparif de 2000 à 2012 ; <i>source des données : Airparif</i>	91
Figure V.16 : Représentation schématique de l'évolution journalière de couche limite atmosphérique sur un sol plat et de la situation de la Tour Eiffel lorsque le 3 ^{ème} étage a des taux plus élevés la nuit ; <i>adapté d'après Stull, 1988</i>	92
Figure VI.1 : Nombre de jours où le seuil de recommandation et d'information a été dépassé ; <i>source : Observatoire des déplacements à Paris, 2012</i>	94
Figure VI.3 : Variabilité temporelle des taux horaires d'O ₃ pour différentes stations urbaines, périurbaines et rurales, et des paramètres météorologiques en région parisienne les 27 et 28 juin 2011 ; <i>source des données : Airparif, Météo France, CGIAR International Research Centers</i>	98
Figure VI.4 : Photographie prise du deuxième étage de la Tour Eiffel le 29 juin 2009 à 18h40.....	99
Figure VI.5: Variabilité spatiale des concentrations journalières de PM10 et des maxima de NO ₂ , et direction du vent moyen horaire du 20 au 24 décembre 2007	100
Figure VI.6 : Variation temporelle des concentrations horaires de PM10 et de NO ₂ du 20 au 24 décembre 2007	102
Figure VI.7 : Variation temporelle des concentrations horaires de PM10 du 10 mars au 7 avril 2012	104
Figure VI.8 : Fréquence de la direction du vent moyen horaire selon la qualité de l'air et les taux horaires de PM10 du 10 mars au 7 avril 2012 ; <i>source des données : Airparif, Météo France</i>	105
Figure VI.9 : Photographie de la place de la Concorde, le 20 mars 2011 à 15h	106
Partie III : Variabilité de l'ozone et des particules sur les sites touristiques parisiens	
Figure VII.1 : Analyseur portable 2B Technologie Model 205.....	112
Figure VII.2 : Analyseur portable Dustmate Turkney Instrument.....	113
Figure VII.3 : Transects des mesures de concentration d'ozone effectuées le 30 juin et 1 ^{er} juillet 2009, et itinéraire des mesures en Vélib' du 30 juin 2009	115
Figure VII.4 : Photographie des hauteurs du capteur d'ozone lors des mesures de terrain du 1 ^{er} juillet 2009 (à gauche) et du capteur de particule le 29 juin 2010 (à droite)	115
Figure VII.5 : Transects et modes de transport utilisé lors des mesures de concentration de particules	115
Figure VII.6 : Photo du capteur d'ozone placé dans le panier du vélo	116
Figure VII.7 : Photo de notre emplacement dans les bus touristiques lors des mesures des particules	117
Figure VII.8 : Photo de notre emplacement dans les péniches touristiques lors des mesures des particules	117
Figure VII.9 : Variabilité des concentrations horaires d'ozone mesurée dans les stations parisiennes du réseau Airparif ; <i>source des données : Airparif*</i>	118

Figure VII.10 : Nuage de points entre les taux de PM10 mesurés à la station Paris 18 ^{ème} et ceux mesurés par le capteur Dustmate à Maisons-Alfort.....	119
Figure VII.11 : Humidité relative mesurée à Paris Montsouris lors des mesures de terrain et période de ces mesures	120
Figure VIII.1 : Taux moyens horaires mesurés aux stations parisiennes de Airparif et avec le capteur d’ozone 2B Technologie, les 30 juin et 1 ^{er} juillet 2009 ; <i>source des données : Airparif</i>	122
Figure VIII.2 : Panneau de la mairie de Paris avec la qualité de l’air et la température du 30 juin 2009	122
Figure VIII.3 : Taux d’ozone mesurés à vélo avec un pas de temps de 10 secondes le 30 juin 2010	124
Figure VIII.4 : Trajet des mesures des taux d’ozone à vélo le 30 juin 2010 et photographie sur le quai des Saints Augustins (à droite) et sur l’allée à côté du Quai d’Orsay (à gauche).....	124
Figure VIII.5 : Variabilité spatiale des concentrations d’ozone sur le site de la Tour Eiffel, le 30 juin 2009 (heure de début des mesures : 16h03, heure de fin des mesures : 17h02)	125
Figure VIII.7 : Photographie du Champ de Mars (à gauche) et du Trocadéro (à droite), le 1 ^{er} juillet 2009	127
Figure VIII.8 : Variabilité spatiale des concentrations d’ozone sur le transect des Champs Élysées – Jardin des Tuileries, le 1 ^{er} juillet 2009.....	128
Figure IX.1 : Concentrations moyennes sur une minute de PM10 et de PM2,5 lors de trajet à pied de 14h à 16h, les 28 et 29 juin 2010	131
Figure IX.2 : Photographies prises le 28 juin (A,B,C) et le 29 juin 2010 (D) durant les mesures de particules	132
Figure IX.3 : Variations des concentrations moyennes sur une minute en PM10 et en PM2,5 et moyenne selon les différents espaces (traits horizontaux), parcours et photographies lors d’un trajet en bus touristique de 13h55 à 15h50 le 25 mars 2011	134
Figure IX.4 : Concentrations moyennes sur une minute en PM10 et en PM2,5 mesurées en péniche et trajet de la péniche le 26 avril 2011	135
Figure IX.5 : Taux de PM10 et de PM2,5 mesurés sur l’avenue des Champs Élysées et la rue de Royale en bus touristique le 25 mars 2011 et à vélo le 21 et 26 mars 2012.....	137
Partie VI : Perception de la pollution de l’air par les touristes à Paris	
Figure X.1 : Questionnaire réalisé auprès des touristes à Paris en 2011 (recto)	144
Figure X.1 : Questionnaire réalisé auprès des touristes à Paris en 2011 (verso)	145
Figure X.2 : Extrait de la page sur la qualité de l’air à Paris sur le site de l’Office du Tourisme et des Congrès de Paris, <i>source : http://www.parisinfo.com, consulté en octobre 2012</i>	146
Figure X.3 : Localisation des sites des enquêtes ; <i>source du fond de carte : OpenStreetMap</i>	152
Figure X.4 : Site de la Tour Eiffel avec les points et les directions des prises de vue des photographies ; <i>source du fond de carte : OpenStreetMap</i>	153
Figure X.5 : Photographies du site de la Tour Eiffel	154
Figure X.6 : Photographies du site de Notre Dame.....	155
Figure X.7 : Site de Notre-Dame avec les points et les directions des prises de vue des photographies ; <i>source du fond de carte : OpenStreetMap</i>	156

Figure X.8 : Site du Sacré-Cœur avec les points et les directions des prises de vue de prise de vue des photographies ; <i>source du fond de carte : OpenStreetMap</i>	157
Figure X.9 : Photographies du site du Sacré-Cœur	158
Figure XI.1 : Réponses des touristes à la question « Pensez-vous que l'air de Paris est pollué ? » (A) et à la question « Ressentez-vous des nuisances environnementales à Paris » (B) selon les jours d'enquêtes.....	164
Figure XI.2 : Réponses des touristes à leur estimation de la qualité de l'air à Paris selon les jours d'enquêtes	166
Figure XI.3 : Vue de la Tour Eiffel à partir d'une webcam Earthcam ; <i>source : www.earthcam.com</i>	167
Figure XI.4 : Réponses des touristes à la question « Au cours de votre séjour à Paris, avez-vous ressenti plus que d'habitude une irritation des yeux (A) et une irritation du nez (B) ? » selon les jours des enquêtes.	168
Figure XI.5 : Réponses des touristes à la question « Durant votre séjour, le temps est (A) et la température est (B) ? » selon les mois des enquêtes.....	169
Figure XI.6 : Estimation des touristes de la qualité de l'air à Paris selon les lieux des enquêtes.	171
Figure XI.7 : Panorama pris du Sacré-Cœur le 27 juillet 2011 à 15h.....	172
Figure XI.8 : Réponses des touristes à la question « Au cours de votre séjour à Paris, avez-vous ressenti plus que d'habitude une grande fatigue (A), une visibilité réduite (B), des difficultés respiratoires (C) et des odeurs désagréables (D) ? » selon les lieux des enquêtes.	173
Figure XI.9 : Réponses des touristes à la question « Durant votre séjour, la propreté est (A) et le bruit est (B) ? » selon les mois des enquêtes.....	174
Figure XI.10 : Photographies prises à la butte de Montmartre, le 10 mai 2013	175
Figure XI.11 : Réponses des touristes à leur estimation de la qualité de l'air à Paris selon les modes de transport utilisés par les touristes dans Paris.....	177
Figure XII.1: Réponses des touristes à leur estimation de la qualité de l'air à Paris selon l'origine des touristes	180
Figure XII.2 : Réponses des touristes à la question « Ressentez-vous des nuisances environnementales à Paris ? » selon l'origine des touristes	181
Figure XII.3 : Moyennes annuelles de PM10 pour quelques grandes villes mondiales réalisées à partir des données de l'OMS, <i>source : Le Monde</i> , 27 septembre 2011	184
Figure XII.4 : Proposition du moteur de recherche du <i>Figaro</i> pour affiner la recherche sur « pollution de l'air », <i>source : Le Figaro</i> , recherche effectuée le 12 octobre 2012.....	184
Figure XII.5 : Illustration de l'article « Des polluants industriels aux transports : la pollution de l'air a changé de nature » paru le 29 septembre 2011 dans <i>Le Monde</i>	185
Figure XII.7 : Dessin de Cécile Bertrand, Belgique, paru dans le <i>Courrier International</i> du 1 ^{er} mars 2013	186
Figure XII.8 : Touristes chinois sur le parvis de Notre-Dame, le 25 juillet 2012	190
Figure XII.9 : Jeunes touristes japonaises à la Tour Eiffel, le 10 octobre 2011	190

Table des tableaux

Partie I : Mesures et variabilités de l'exposition et de la perception de la pollution de l'air extérieur

Tableau I.1 : Normes françaises à long terme et court terme pour l'O₃, le NO₂, les PM₁₀ et PM_{2,5} ;
source : <http://www.airparif.asso.fr>..... 19

Tableau II.1 : Classification et objectifs des stations françaises du réseau ASQAA ; source : ADEME,
2002..... 32

Tableau II.2: Indice ATMO ; source : Airparif..... 36

Tableau II.3: Indice européen Citeair ; source : Airparif..... 37

Partie II : Variabilité spatiale et temporelle de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules en région parisienne

Tableau IV.1 : Altitude au dessus du niveau de la mer et hauteurs de prélèvements des stations de
fond (urbaine, périurbaine, rurale) appartenant au réseau Airparif ; sources des données : Airparif,
Google Earth..... 62

Tableau V.1 : Paramètres statistiques décrivant les taux journaliers d'O₃, la température moyenne
journalière, la durée d'insolation journalière et la radiation globale journalière pour les jours
avec des coordonnées extrêmes sur l'axe 1 ; Source des données : Airparif, Météo France 83

Tableau V.2 : Paramètres statistiques décrivant les taux journaliers de NO₂ et de PM₁₀, la
température minimale journalière et le vent moyen journalier pour les jours avec des
coordonnées extrêmes sur l'axe 1 ; source des données : Airparif, Météo France 85

Partie III : Variabilité de l'ozone et des particules sur les sites touristiques parisiens

Tableau IX.1 : Concentrations moyennes de PM_{2,5} et PM₁₀, vitesse du vent et température
minimale selon les jours et les modes de transport utilisés..... 130

Partie IV : Perception de la pollution de l'air par les touristes à Paris

Tableau X.1 : Origine des arrivées hôtelières à Paris en 2008 et 2009, source : Office du tourisme et
des congrès de Paris, 2010..... 149

Tableau X.2 : Profil des touristes interrogés selon leur pays de provenance, leur sexe et leur âge
..... 149

Tableau X.3 : Jours des enquêtes avec les indices ATMO, sites des enquêtes et nombre d'enquêtes
réalisées..... 150

Tableau XI.1 : Qualité de l'air durant les jours d'enquêtes de terrain en juin, juillet, août et octobre
2011, source données : Airparif..... 162

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Partie I : Mesures et variabilités de l'exposition et de la perception de la pollution de l'air extérieur.....

Chapitre I : Les polluants, leur réglementation et leurs facteurs de variabilité	9
---	----------

I.1. Définition, sources et formation des polluants problématiques	9
I.1.1. Le dioxyde d'azote NO ₂	11
I.1.2. L'ozone O ₃	12
I.1.3. Les particules PM ₁₀ et PM _{2,5}	13
Les particules « primaires »	14
Les particules « secondaires »	15
I.2. Effets sur la santé et réglementations de la pollution de l'air.....	16
I.2.1. Effets sanitaires de la pollution de l'air	16
I.2.2. Les réglementations de la pollution de l'air.....	17
I.3. Facteurs de variabilité spatiale et temporelle de la pollution atmosphérique	20
I.3.1. Les sources d'émission	20
I.3.2. L'influence des conditions météorologiques	22
Influence des conditions météorologiques synoptiques	23
Influence des conditions météorologiques à l'échelle locale	23
Influence de la morphologie urbaine sur les microclimats et la pollution de l'air	26

Chapitre II : Mesures et évaluation de l'exposition à la pollution de l'air	27
--	-----------

II.1. L'exposition individuelle à la pollution de l'air	27
II.2. Les mesures de la pollution de l'air	30
II.2.1. Les réseaux de mesures	30
II.2.2. Les campagnes de mesure	33
II.2.3. La mesure de la pollution de proximité	34
II.3. L'évaluation et la modélisation de la pollution de l'air	35

Chapitre III : La perception de la pollution de l'air extérieur	39
--	-----------

III.1. La perception sensorielle de la pollution de l'air	39
III.1.1. La perception visuelle	39
III.1.2. La perception olfactive	44
III.1.3. Les nuisances sonores	44

III.2. La cognition et la représentation de la pollution de l'air	45
III.2.1. Informations et médiatisation sur la qualité de l'air	45
III.2.2. Expérience personnelle de la qualité de l'air	50
III.2.3. Vision de la société holistique et de la société analytique.....	50
 Conclusion Partie I.....	53
 Partie II : Variabilité spatiale et temporelle de l'ozone, du dioxyde d'azote et des particules en région parisienne	55
Chapitre IV : Réseaux de mesures en région parisienne et approche méthodologique.....	57
IV.1. Les stations automatiques de mesures de la pollution de l'air du réseau Airparif et les données utilisées.....	57
IV.1.1. Le réseau Airparif.....	57
IV.1.2. Les types de stations de mesure	58
Les stations trafic	58
Les stations de fond.....	60
La station d'observation (Tour Eiffel).....	62
IV.1.3. Les méthodes de mesure des polluants	62
Données issues des stations et lacunes	63
IV.1.4. Les données météorologiques issues des stations de mesure Météo France	63
IV.1.5. Les bulletins climatiques quotidiens	64
IV.1.6. Les radiosondages.....	64
IV.1.7. Les rétrotrajectoires des masses d'air	64
IV.2. Les approches méthodologiques du traitement des taux de polluants et des données météorologiques	65
IV.2.1. Étude descriptive à l'aide de statistiques univariées et bivariées	65
IV.2.2. Analyses en composantes principales.....	66
 Chapitre V : Contexte régional et variabilité spatio-temporelle des taux d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules en région parisienne	69
V.1. Contexte régional et niveaux de pollution en région parisienne.....	69
V.1.1. Un site favorable à la dispersion de la pollution de l'air.....	69
V.1.2. Une densité importante d'émission de polluants	71
V.1.3. Stagnation des niveaux annuels d'O ₃ , de NO ₂ , de PM ₁₀ et de PM _{2,5} de 2000 à 2012	73
V.2. Variabilité spatio-temporelle des concentrations journalières d'O ₃ , de NO ₂ , de PM ₁₀ et de PM _{2,5}	76
V.2.1. Dispersion relativement uniforme des concentrations de polluants issues des stations franciliennes	76
Variabilité des taux journaliers relativement similaire en région parisienne..	76
Différence de niveaux de pollution selon la proximité du trafic routier.....	77

Variabilité spatiale des concentrations de NO ₂ selon la direction du vent	80
V.2.2. Influence des émissions sur la variabilité temporelle des concentrations journalières d'O ₃ , NO ₂ et PM ₁₀	82
V.2.3. Influence des conditions météorologiques sur la variabilité temporelle des taux journaliers d'O ₃ , de NO ₂ et de PM ₁₀	83
Période photochimique de l'O ₃	83
Fortes concentrations de PM ₁₀ et de NO ₂ durant les temps stables en période hivernale et printanière	84
Influence du vent sur la dispersion de l'O ₃ , du NO ₂ et des PM ₁₀	85
V.3. Cycle et variation spatiale des concentrations horaires d'O ₃ , de NO ₂ , de PM ₁₀ et de PM _{2,5}	86
V.3.1. Variabilité horaire selon les sources d'émission et l'insolation	87
V.3.2. Variabilité spatiale similaire en heure de pointe et en heure creuse.....	89
V.3.3. Influence du relief sur la variabilité spatio-temporelle des taux horaires d'O ₃	90
Chapitre VI : Épisodes de pollution à l'ozone, au dioxyde d'azote et aux particules en région parisienne	93
VI.1. Les épisodes de pollution en région parisienne	93
VI.2. Les épisodes de pollution photochimique	95
VI.3. Les épisodes de pollution hivernaux et printaniers	99
VI.3.1. Les épisodes de pollution hivernaux.....	99
VI.3.2. Les épisodes de pollution de la fin de l'hiver et du début du printemps..	103
 <i>Conclusion partie II.....</i>	<i>107</i>
 <i>Partie III : Variabilité de l'ozone et des particules sur les sites touristiques parisiens</i>	<i>109</i>
Chapitre VII : Protocole de mesure des taux d'ozone et de particules fines sur les sites touristiques parisiens.....	111
VII.1. Analyseurs portables d'ozone et de particules.....	111
VII.1.1. Analyseurs d'ozone : 2B Technologies Model 205 et Model 202	111
VII.1.2. Analyseur de particules fines: Dustmate Turkney Instrument	112
VII.2. Instruments de mesure complémentaires	113
VII.2.1. Capteurs météorologiques.....	113
VII.2.2. GPS et caméra	114
VII.3. Itinéraires et moyens de transport	114
VII.3.1. À pied	114
VII.3.2. En vélo	116
VII.3.3. En bus touristique	116
VIII.3.4. En péniche.....	117
VII.4. Jours et horaires des mesures	117

VII.4.1. En période photochimique et durant le niveau d'équilibre d'ozone journalier	118
VII.4.2. Lorsque l'humidité relative est inférieure à 40%	118
Chapitre VIII : Exposition des touristes à l'ozone lors d'un épisode de pollution sur des sites touristiques parisiens	121
VIII.1. Influence des conditions météorologiques sur les taux moyens d'ozone mesurés sur le terrain	121
VIII.2. Variabilité spatiale des concentrations d'ozone à l'échelle locale	123
VIII.2.1. Très forte variabilité des concentrations d'ozone en vélo	123
VIII.2.2. Étude de la variabilité spatiale autour de la Tour Eiffel.....	125
VIII.2.3. Étude de la variabilité spatiale sur le transect allant des Champs Élysées au Jardin des Tuileries	127
Chapitre IX : Variabilité spatiale des particules selon différents itinéraires et modes de transports touristiques à Paris	129
IX.1. Influence des conditions météorologiques sur les niveaux de particules	129
IX.1.1. Conditions météorologiques synoptiques et niveaux de particules.....	129
IX.1.2. Influence des précipitations sur le lessivage de la pollution de l'air.....	131
IX.2. Influence de la proximité des sources d'émission	132
IX.2.1. Des émissions d'origine terrigène	132
IX.2.2. Des émissions d'origine anthropique	133
IX.3. Influence de la morphologie urbaine et des brises.....	136
IX.4. Différences entre les modes de transport utilisés.....	136
<i>Conclusion partie III</i>	<i>139</i>
<i>Partie IV : Perception de la pollution de l'air par les touristes à Paris</i>	<i>141</i>
Chapitre X : Questionnaires, lieux et jours des enquêtes.....	143
X.1. Construction des enquêtes par questionnaire	143
X.1.1. Évaluation de la pollution de l'air par les touristes	145
X.1.2. Facteurs de représentation de la pollution de l'air.....	146
X.2. Diversité des touristes interrogés	148
X.3. Hétérogénéité des lieux et jours des enquêtes	150
X.3.1. Jours et heures des enquêtes de terrain	151
X.3.2. Trois lieux pour réaliser les enquêtes	152
Site de la Tour Eiffel : espace «vert» et « aéré »	153
Le site de Notre-Dame, un espace aéré au milieu des quais de Seine et du trafic routier.....	154
Le site du Sacré-Cœur avec une vue sur Paris	156

Chapitre XI : Entre exposition et perception de la pollution atmosphérique par les touristes	161
XI.1. Une exposition et une perception différentes selon les jours et les heures	161
XI.1.1. Niveaux de pollution et conditions météorologiques diverses lors des jours d'enquêtes.....	161
XI.1.2. Variabilité des perceptions selon le jour et les heures des enquêtes	163
Variabilité de la perception de la qualité de l'air selon les jours	164
Perception de la qualité de l'air selon sa visibilité ?	166
Ressenti physique de la pollution de l'air ?	167
Variabilité des perceptions selon les conditions météorologiques ?	169
XI.2. Variabilité des perceptions et de l'exposition sur les trois lieux touristiques	170
XI.2.1. Le Sacré-Cœur, un site pollué ?	171
XI.2.2. Les odeurs et le bruit autour de Notre-Dame	174
XI.2.3. Le site de la Tour Eiffel, un site non pollué ?	175
XI.3. Modes de transport et lieu de résidence	176
Chapitre XII : Représentation de la qualité de l'air par les touristes à Paris	179
XII.1. Des différences de perception observées entre les touristes français et les touristes étrangers	179
XII.2. La qualité de l'air moins bien perçue par les français ?	181
XII.2.1. La qualité de l'air moins bonne en région parisienne que dans les autres agglomérations françaises ?	182
XII.2.2. Des différences observées chez les touristes français	186
XII.3. Une diversité de perception chez les touristes étrangers ?	187
XII.3.1. Perception occidentale de la qualité de l'air	187
XII.3.2. Expérience physique de la qualité de l'air	189
XII.3.3. Incompréhension des asiatiques et vision holistique de la pollution atmosphérique	189
 Conclusion partie IV.....	 193
Conclusion générale et perspectives.....	195
Bibliographie	203
Table des figures	215
Table des tableaux	221
Table des matières	223
Annexes.....	225

Annexes

Annexe A : Variabilité spatiale et temporelle des taux d'O₃, situation météorologique et rétrotrajectoires du 8 mai au 12 mai 2008 B

Annexe B : Bulletin d'analyse de la pression au sol du 20 décembre au 24 décembre 2007 ; source : www.wetterzentrale.de C

Annexe C : Variabilité spatiale et temporelle des taux de PM₁₀, situation météorologique et rétrotrajectoires le 10 et 11 janvier 2009..... F

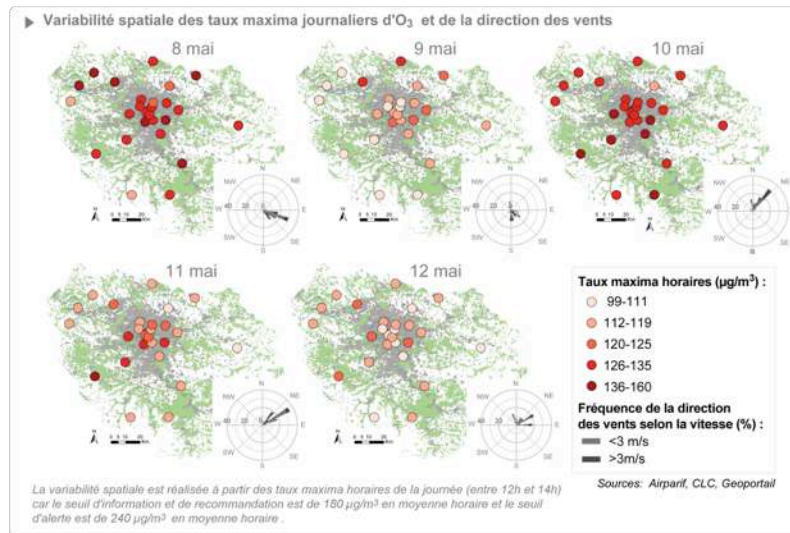
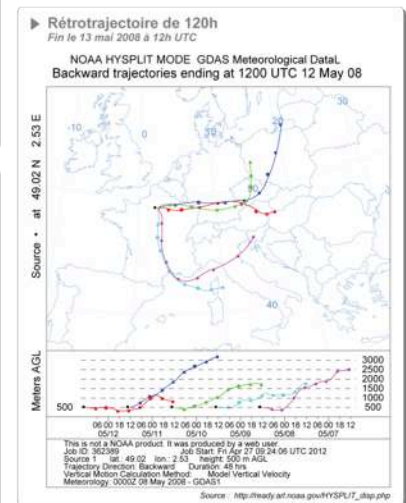
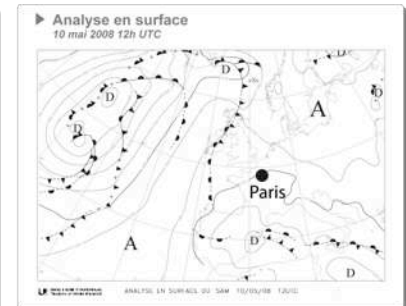
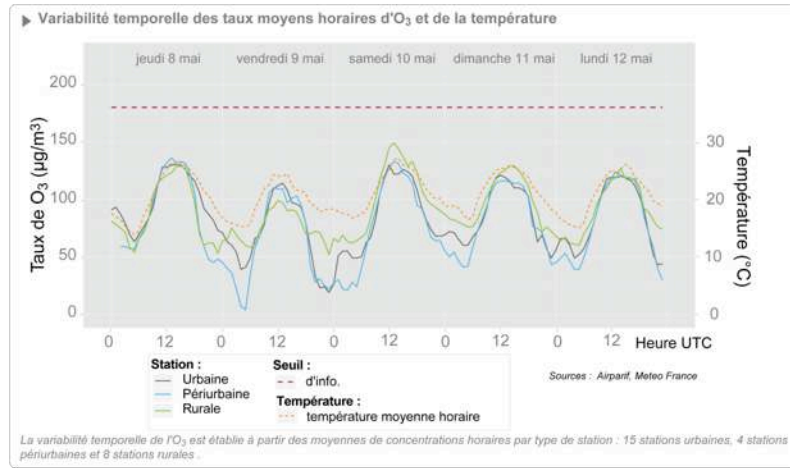
Annexe D : Variabilité spatiale et temporelle des taux de PM₁₀, situation météorologique et rétrotrajectoires du 14 au 16 avril 2007 G

Annexe E : Enquêtes de terrain réalisées en 2009 H

Annexe F : Enquêtes de terrain réalisées en 2010 L

Annexe A :

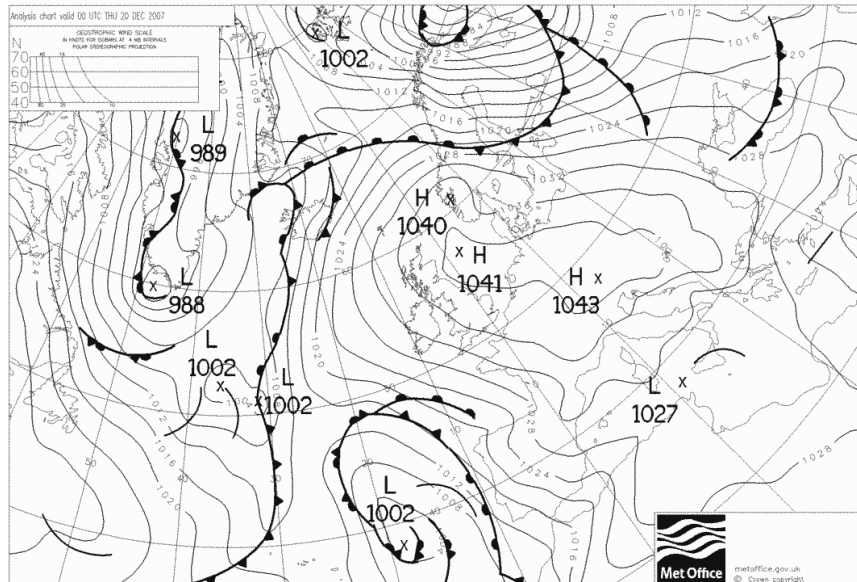
Variabilité spatiale et temporelle des taux d'O₃, situation météorologique
et rétrotrajectoires du 8 mai au 12 mai 2008



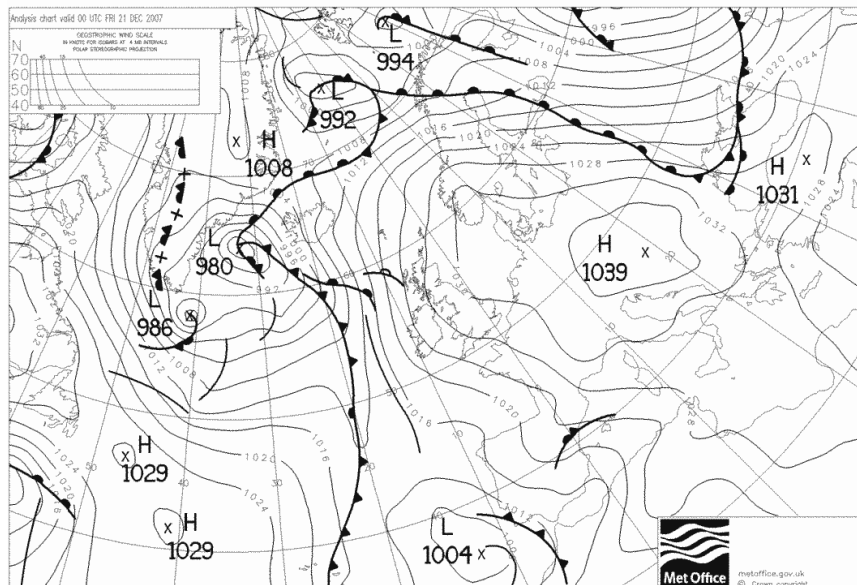
Annexe B :

Bulletin d'analyse de la pression au sol du 20 décembre au 24 décembre
2007 ; source : www.wetterzentrale.de

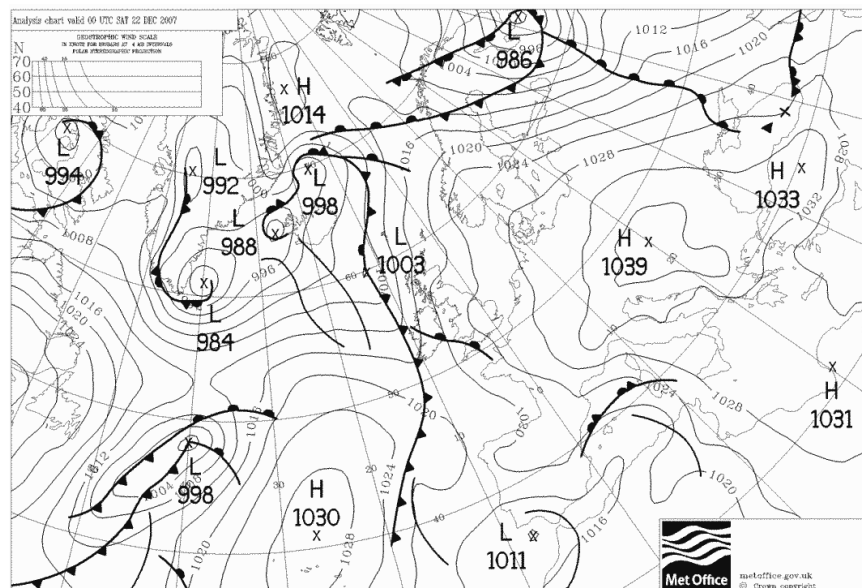
20 décembre 2007



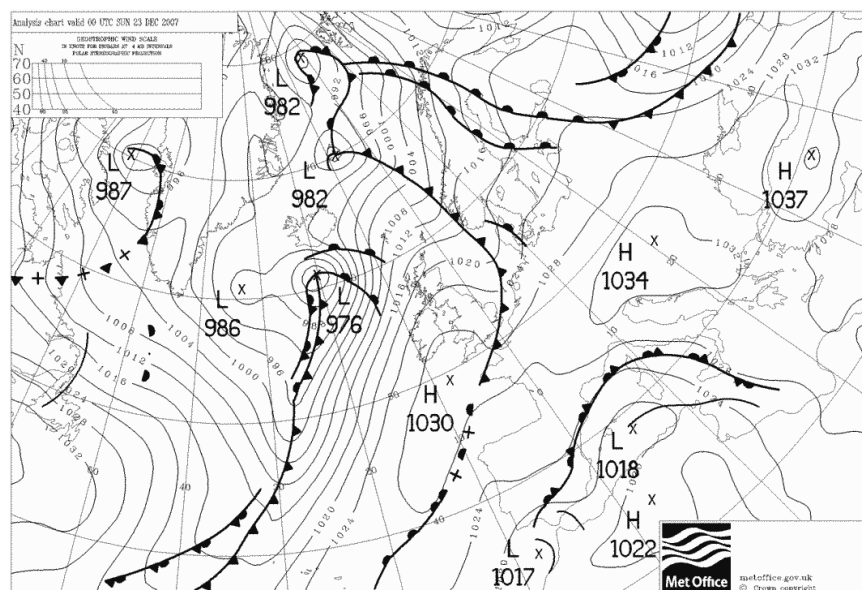
21 décembre 2007



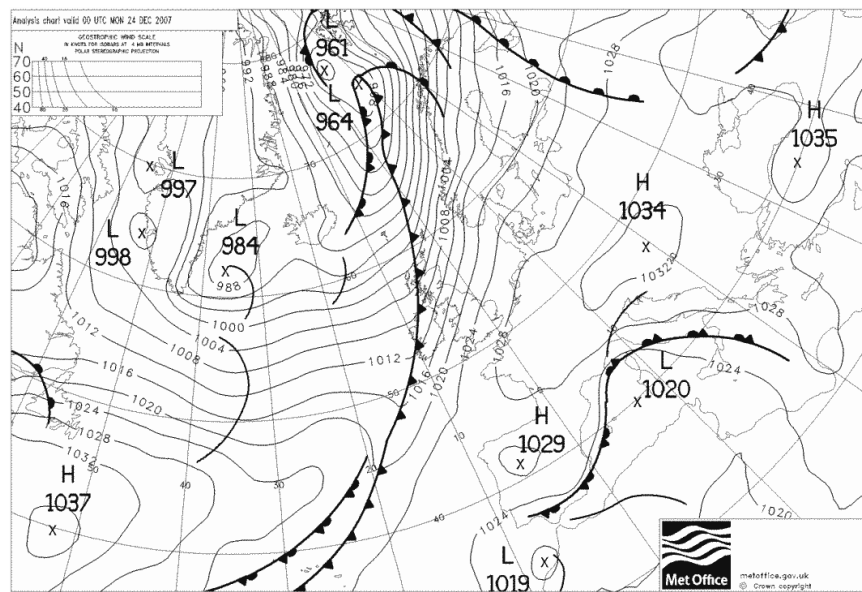
22 décembre 2007



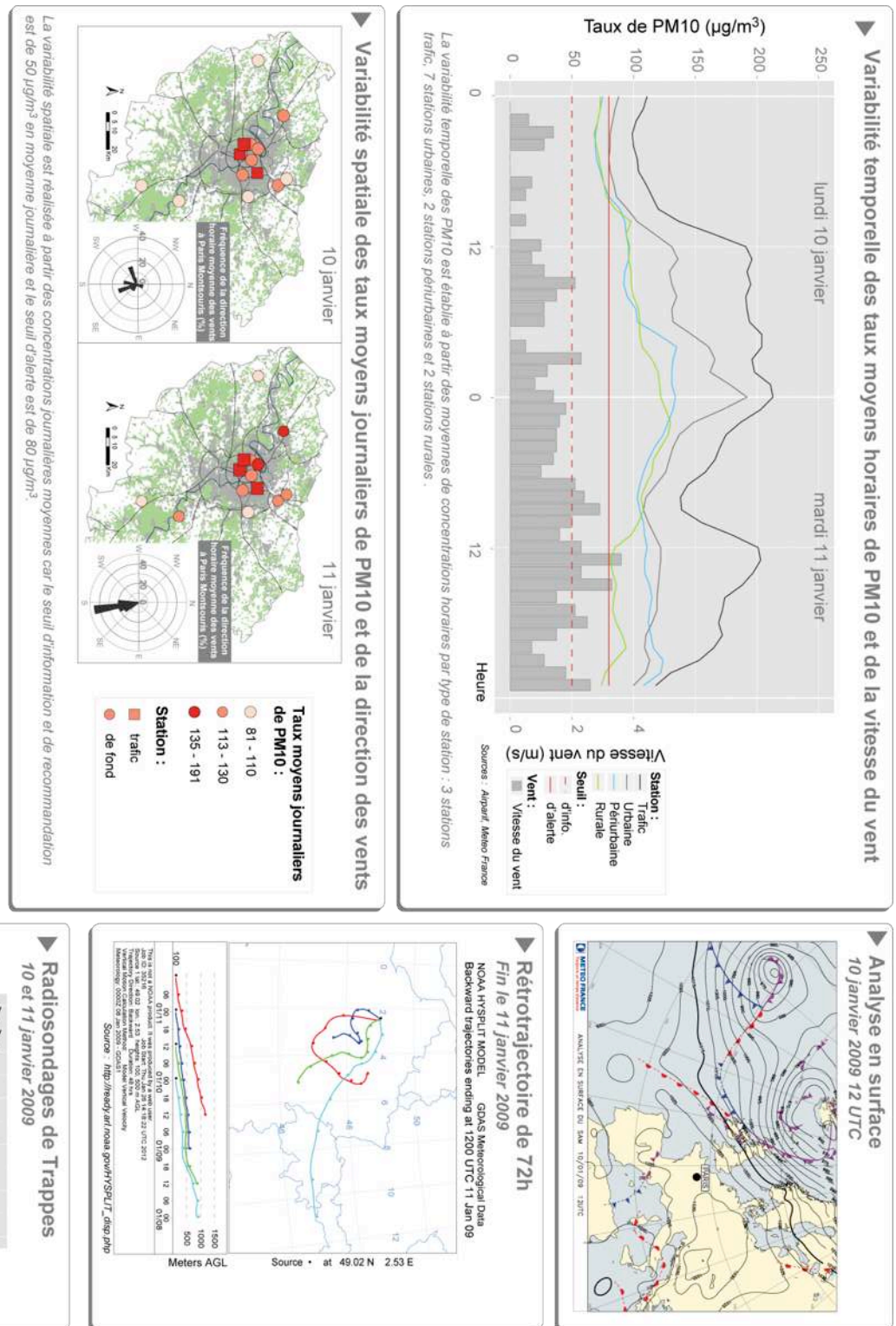
23 décembre 2007



24 décembre 2007

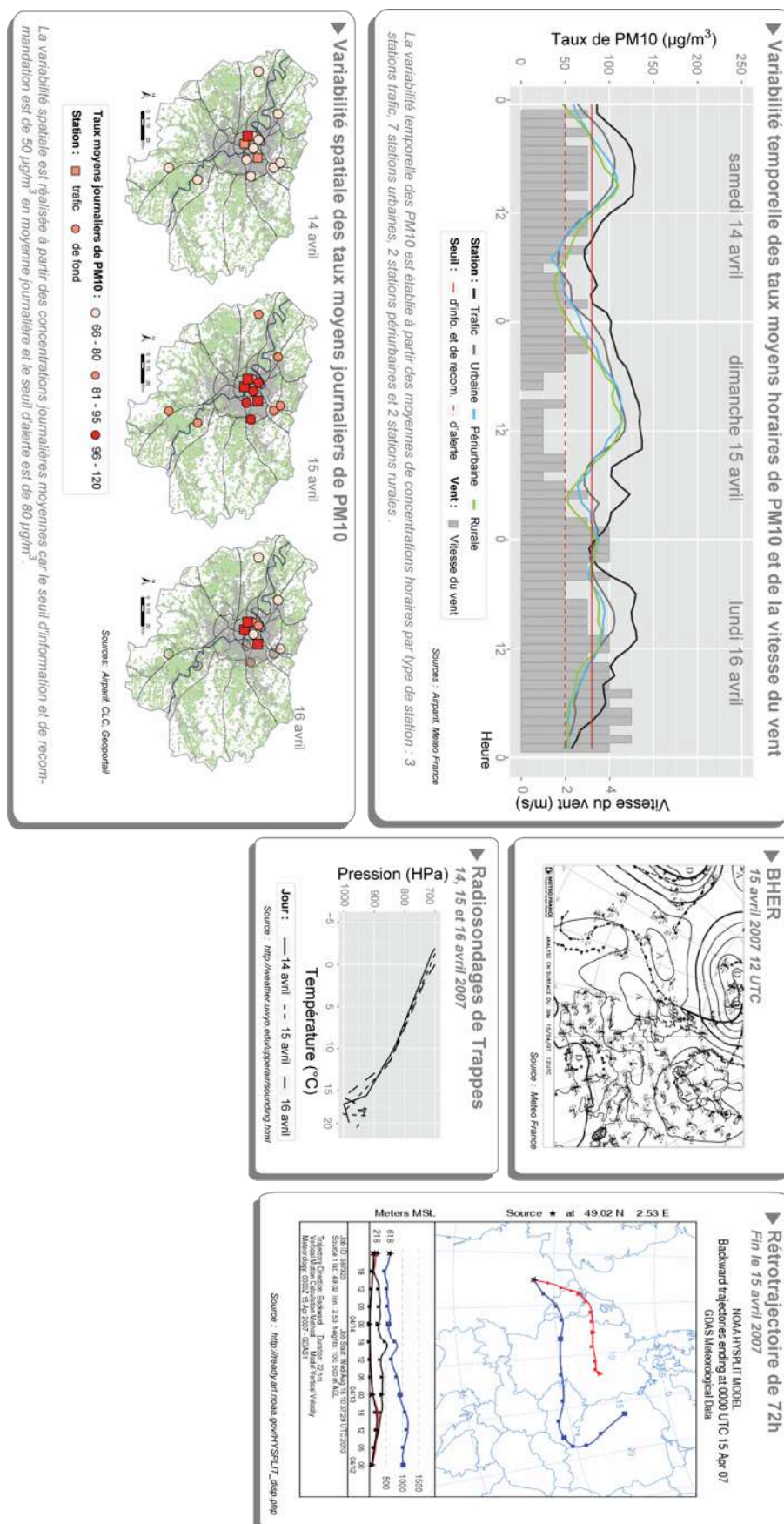


Annexe C :

Variabilité spatiale et temporelle des taux de PM₁₀, situation météorologique et rétrotrajectoires le 10 et 11 janvier 2009

Annexe D :

Variabilité spatiale et temporelle des taux de PM10, situation météorologique et rétrotrajectoires du 14 au 16 avril 2007



Annexe E : Enquêtes de terrain réalisées en 2009

Enquête de terrain

Perception de la qualité de l'air en Ile de France



Ce questionnaire est réalisé dans le cadre d'une recherche doctorale afin de connaître la perception des touristes sur la qualité de l'air en Ile de France.

Date :/...../.....		
Êtes-vous ? : <input type="checkbox"/> Francilien	<input type="checkbox"/> Français	<input type="checkbox"/> Autres

A- Connaissance et perception des problèmes environnementaux

	Pas du tout	Un peu	Beaucoup	Complètement	Ne sais pas
1) Êtes-vous informés par les problèmes environnementaux actuels (changement climatique, pollution de l'air...)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) Vous sentez-vous concernés ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) Ressentez-vous des nuisances environnementales :					
⇒ où vous habitez ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⇒ à Paris ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4) Si oui, lesquelles vous semblent importantes: (*plusieurs réponses possibles*)

	où vous habitez ?	à Paris ?
- Bruit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- Pollution de l'air	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- Qualité de l'eau à boire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- Qualité de l'eau du fleuve, rivière, lac, mer...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- Propreté dans la ville	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

B- Perception de la pollution de l'air

5) Pensez-vous que l'air de Paris est pollué?

☐ Non☐ Oui

6) Notez la qualité de l'air sur 10 : (1 étant une qualité de l'air mauvaise, 5 moyenne et 10 une très bonne qualité de l'air)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
⇒ dans votre ville ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⇒ à Paris ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7) Avez-vous ressenti une pollution de l'air plus importante à Paris?

➤ un jour précis ?

☐ Non☐ Oui

si oui, lequel ?.....

➤ sur un lieu précis ?

☐ Non☐ Oui

si oui, lequel ?.....

8) Au cours de votre séjour dans la région parisienne, avez-vous ressenti :

	Jamais	De temps en temps	Souvent	Tout le temps	Ne sais pas
- des odeurs désagréables?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- une visibilité réduite des points de vue parisiens (de la Tour Eiffel, du Sacré-Cœur, de Notre Dame ...) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- une irritation des yeux ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- une irritation du nez ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- des difficultés à respirer ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- des maux de tête ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- une fatigue accrue ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⇒ D'après vous, ses symptômes sont-ils dus à la pollution de l'air ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C- Le temps à Paris

9) Que pensez-vous des conditions météorologiques suivantes, durant votre séjour?

Le temps est ☐ Désagréable ☐ Plutôt agréable ☐ Agréable ☐ Très agréable

La température est ☐ Satisfaisante ☐ Trop froide ☐ Trop chaude ☐ Instable

L'ensoleillement est ☐ Satisfaisant ☐ Assez faible ☐ Trop faible

D- Influence sur la fréquentation touristique

	Pas du tout	Un peu	Beaucoup	Complètement
10) La qualité de l'air de Paris a-t-elle été prise en compte dans votre choix de destination touristique ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) La qualité de l'air durant ce séjour peut-elle être un frein à votre retour à Paris ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

E- Mode de déplacement

12) Quel mode de transport avez-vous utilisé :

- pour arriver à Paris ? *Plusieurs réponses possibles*

☐ Avion ☐ Voiture ☐ Car (autobus)
☐ Train ☐ Autre, précisez :

- pour vous déplacer dans Paris ? *Plusieurs réponses possibles*

☐ Voiture ☐ Car touristique ☐ Taxi
☐ Transport en commun (métro, RER, bus) ☐ Vélo (Vélib') ☐ Pieds

13) Pourquoi choisissez-vous ce(s) mode(s) de transport ? *Plusieurs réponses possibles*

☐ Pour le prix
☐ Pour la simplicité
☐ Pour le respect de l'environnement
☐ Autre, précisez :

F- Information générale

14) Séjournez-vous ?

☐ Dans Paris☐ En banlieue parisienne, *précisez la ville* :

15) Combien de jours ?

16) Votre lieu de résidence est-il ?

☐ Un hôtel☐ Un camping☐ Un appartement loué☐ Une chambre chez l'habitant☐ Autre (famille, amis...)

17) Aviez-vous déjà séjourné à Paris ?

☐ Jamais☐ Quelques jours☐ Quelques
semaines☐ Quelques mois☐ Plus d'un an*Réponses facultatives :*

18) Âge : Ans

19) Sexe : ☐ F☐ M

20) Nationalité :

21) Ville ou région de votre lieu de domicile :

Commentaires:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Annexe F : Enquêtes de terrain réalisées en 2010

Enquête de terrain

Perception de la qualité de l'air en Ile de France



Ce questionnaire est réalisé dans le cadre d'une recherche doctorale afin de connaître la perception des touristes sur la qualité de l'air en Ile de France.

Date :/...../.....

1. Vous sentez-vous concernés par les problèmes environnementaux actuels (changement climatique, pollution de l'air...)?

Pas du tout	Un peu	Beaucoup	Complètement	Ne sais pas
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2. Ressentez-vous des nuisances environnementales :

	Oui	Non	Si oui, lesquelles ?	<input type="checkbox"/> Bruit	<input type="checkbox"/> Qualité de l'eau à boire
⇒ à Paris ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Ne sais pas	<input type="checkbox"/> Propreté	<input type="checkbox"/> Pollution de l'air
⇒ dans votre ville ?	Oui	Non	Si oui, lesquelles ?	<input type="checkbox"/> Bruit	<input type="checkbox"/> Qualité de l'eau à boire
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Ne sais pas	<input type="checkbox"/> Propreté	<input type="checkbox"/> Pollution de l'air

3. Pensez vous que l'air de Paris est pollué ? ☐ Oui ☐ Non

Très mauvaise

Excellente

4. La qualité de l'air est : ☹️ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ☺️

⇒ à Paris	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⇒ dans votre ville	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. Au cours de votre séjour à Paris, avez-vous ressenti plus que d'habitude:

	Jamais	De temps en temps	Souvent	Tout le temps	Ne sais pas
⇒ des odeurs désagréables	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⇒ une irritation des yeux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⇒ une irritation du nez	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⇒ des difficultés respiratoires	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

⇒ une grande fatigue

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Tournez la page, s'il vous plaît



6. Selon vous ces symptômes (irritation des yeux, du nez, fatigue, odeurs désagréables), peuvent-être dus : (plusieurs réponses possibles)

☐ au bruit ☐ à la météo ☐ à la pollution de l'air ☐ Ne sais pas

☐

autre :
.....

7. Durant votre séjour,



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

⇒ le temps est ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

⇒ la température est ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

⇒ l'ensoleillement est ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Information générale :

9. Séjournez-vous ?

☐ Dans Paris
☐ En banlieue parisienne, précisez la ville :

.....

10. Depuis combien de jours ?

11. Êtes-vous hébergés dans :

☐ Un hôtel ☐ Un camping ☐ Un appartement loué
☐ Une chambre chez l'habitant ☐ Autre (famille, amis...)

12. Aviez-vous déjà séjourné à Paris ?

☐ Jamais ☐ Quelques jours ☐ Quelques semaines ☐ Quelques mois ☐ Plus d'un an

13. Votre moyen de transport :

⇒ pour arriver à Paris ? *Plusieurs réponses possibles*

☐ Avion ☐ Voiture ☐ Car (autobus)
☐ Train ☐ Autre, précisez :

⇒ pour vous déplacer dans Paris ? *Plusieurs réponses possibles*

☐ Voiture ☐ Car touristique ☐ Taxi
☐ Transport en commun (métro, RER, bus) ☐ Vélo (Vélib') ☐ A pieds

Réponses facultatives :

14. Âge : Ans

15. Sexe : ☐ F ☐ M

16. Nationalité :

17. Ville ou région de votre lieu de domicile :

.....

Merci beaucoup de votre participation. Bon séjour à Paris !